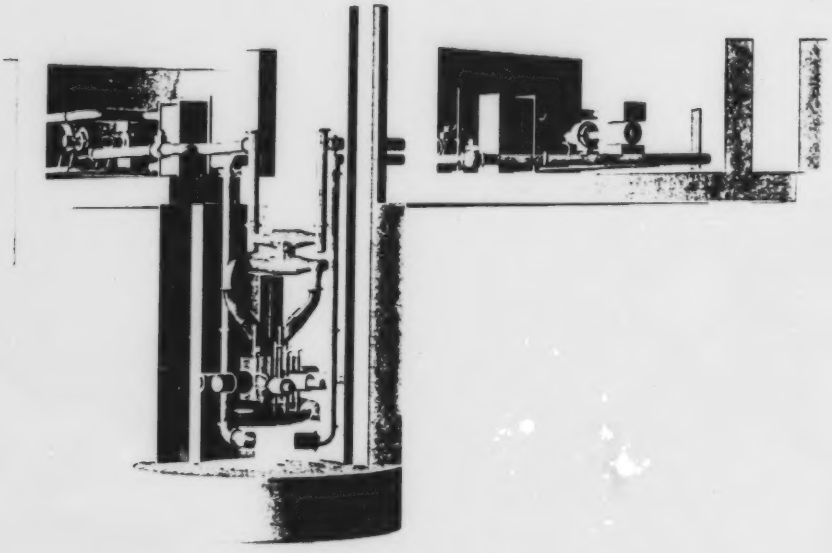
Report of the AECL Research & Development Advisory Panel for 1999



CNF Reactor Systems

102-04295/

1999 Report of the AECL R&D Advisory Panel

D.A. Armstrong

D.H. Lister

R.L. Armstrong

E.A. McCulloch

D.J. Burns

G.G. Patry

A.A. Driedger

J.T. Rogers

J.J. Jonas

D. Rozon

J.H.F. Jennekens

REPORT OF THE
AECL R&D ADVISORY PANEL FOR 1999

TABLE OF CONTENTS

EXECUTIVE SUMMARY i

Chapter 1: Introduction 1

Chapter 2: Rationale For Nuclear Research And Development 3

Chapter 3: CANDU Reactors And The Environment 12

Chapter 4: CANDU R&D 23

Chapter 5: The Canadian Neutron Facility 36

Chapter 6: The Radiation Biology And Health Physics Program 40

Chapter 7: University Relationships 44

APPENDICES

Appendix A: Panel Membership 52
Appendix B: Terms of Reference 53
Appendix C: Panel Publications and Submissions 54
Appendix D: Frequently Used Abbreviations/Acronyms 55

EXECUTIVE SUMMARY

Benefits to Society

Nuclear science and engineering have become so deeply embedded into the way of life in developed societies, that the average citizen is unaware of what the consequences of their withdrawal would be. Further research is still needed in order that society may continue to benefit from the possibilities that exist for the production of energy, while avoiding greenhouse gas emissions, and for new knowledge of the structure of materials.

Without inclusion of nuclear in the energy mix, in both developed and developing countries, it will not be possible to achieve the desired abatement of greenhouse gas emissions that Canada and other countries committed to in the Kyoto Protocol. Canada is a leader in the non-proliferative exploitation of nuclear technology, and a beneficiary of nuclear science through the international marketing of CANDU® and MAPLE reactors and related products, which also contributes significantly to economic development and job creation. It is in the interest of Canada that public funding of nuclear research and development should continue.

Safety

It is a primary concern of vendors, regulators, operators, and customers that all nuclear technology should be safe and, to this end, the Atomic Energy Control Board (AECB) issues licenses and inspects all nuclear facilities in Canada. It is also a requirement of international sales that the AECB have determined that the product would be licensable in Canada.

Since 1988, the AECB has identified a number of postulated modes of reactor failure that are considered to be generic to CANDU† stations, and has required the licensees to provide information about the margins of safety under those failure conditions. The responses necessary to satisfy these Generic Action Items have often required research and development for which AECL's facilities have been essential, even though the onus for the responses rested with the utilities. More recently, the AECB has moved to bring closure to a number of Generic Action Items which have been outstanding for some time.

Computer Codes

Much of AECL's intellectual property is formalized in computer codes for the design and safety analysis of CANDU systems. The codes are mathematical models that describe physical phenomena. They are tested in the laboratory and the levels of uncertainty attached with their use are established before they are deployed. At present, about one third of the safety-related R&D being done in AECL and under CANDU Owners Group programs is devoted to code development. AECL has developed and is implementing a software quality assurance policy to guide its code development processes. Concurrently, the Atomic Energy Control Board has issued a Generic Action Item defining its

† CANDU® is a registered trademark of Atomic Energy of Canada Limited (AECL).

requirements in this area and the criteria for closure of the item. This exercise is serving to define a body of professional skills that AECL must retain if it is to continue to develop, maintain and use this essential resource.

CANDU Reactors

The Zr-2.5% Nb fuel channel is at the heart of the CANDU reactor and its service life is determined by a tendency to undergo geometric distortion under operating conditions, as well as by a change in fracture toughness resulting from the pickup of deuterium. These behaviours have been taken into account through specification of materials, fuel channel design and protocols for inspection of fuel channels in operating reactors, for which latter purpose AECL has designed a new inspection machine.

The development of the CANFLEX fuel bundle was a significant advance, and the use of this fuel design will, in the short term, offset power derating that otherwise becomes necessary when aging fuel channels undergo geometric distortion. The CANFLEX fuel bundle also opens up the possibility of introducing slightly enriched uranium fuel and low void reactivity fuel as fueling options for existing or future reactors. These fueling possibilities offer advantages for the intermediate future. For the long term, the Direct Use of PWR Fuel in CANDU (DUPIC) option for the recycling of used pressurized water reactor (PWR) fuel through CANDU remains possible. The milestone achieved at the Chalk River Laboratories, in the past year when the first fuel pellets from used PWR fuel were produced by the proposed DUPIC process, makes this option more plausible for the long term.

A very positive feature of the CANDU design is that its performance is competitive with current PWR designs and it has much potential for further improvements in efficiency, for adaptation to fuels other than natural uranium, for the addition of passive safety features, and for reductions in capital and operating costs. AECL is conducting research on designs that would operate at higher temperatures and pressures up to those of supercritical water. The possibility of natural circulation, rather than pump-driven flow, is an example of an innovation that would simultaneously contribute to all the above goals. However, detailed studies are needed to determine the effects of sustained operation on materials and components under these conditions. The need for a different form of pressure tube may be met in the form of the CANTHERM composite fuel channel design. To address the requirement of on-power fueling, a new bore seal has been designed. Other requirements for the Advanced CANDU Reactor Concept (CANDU-X) include corrosion-resistant fuel-cladding for the highest temperatures envisaged. Although CANDU-X is a concept rather than a tangible product, the products that evolve from this work can be progressively incorporated into the evolution of CANDU, thus ensuring that successive models will be ever more like CANDU-X.

Heavy Water

Heavy water is the moderator in CANDU reactors. It is essential that AECL has an assured supply of heavy water to service its projected reactor sales. An aggressive research program to develop efficient new ways to concentrate heavy water has culminated in the construction and

commissioning of a prototype Combined Industrial Reformed Hydrogen Catalytic Exchange (CIRCE) plant at Air Liquide in Hamilton. If the prototype proves successful, a number of full-scale plants based on this principle will be required.

Collaboration with the Scientific Community

AECL's intellectual property can only be maintained and developed through the recognition of the national and international science community. Over the decades of its existence, AECL has often supported and benefited from collaborative scientific ventures. It is more important now than ever before that maximum benefits be realized from any expenditures for research infrastructure. The proposal to construct the Canadian Neutron Facility (CNF) as a partnership between AECL and the National Research Council exemplifies the point. The construction of this facility, in a timely fashion, remains the highest priority if AECL is to continue as an innovative reactor vendor with the ability to support its customers through post-sales R&D support. Radiation Biology and Health Physics, hitherto supported entirely as an in-house unit, similarly needs to be repositioned in order to give its scientists the independent public accountability and integration into the fabric of biological science in Canada that they need. Finally, the Panel has reviewed the value that accrues to AECL through its relationships with universities, through the funding of professorial chairs, research contracts and studentships and through the support of co-op programs. The underlying science that is eventually formalized into a product design only happens through the activity of creative and highly trained human minds supplied with the resources necessary for their enterprise. In an era of increasing specialization, the essential ferment can be maintained through partnerships that break down traditional barriers between industry and academe.

CHAPTER 1: INTRODUCTION

This is the eighth annual Report of the R&D Advisory Panel to the AECL Board of Directors, as required by the terms of the Panel's mandate. In preparation for the development of this report, the whole Panel, met on four occasions for a total of ten days to consider presentations by AECL's scientific, product engineering and marketing staff, concerning the development of the CANDU reactor. There were many additional Task Team meetings held throughout the year to develop the material presented in this report.

The Panel also met with representatives of Environment Canada, Industry Canada, the Climate Change Secretariat, the Atomic Energy Control Board (AECB), and Ontario Power Generation Inc. (formerly Ontario Hydro) in order to better understand issues relating to energy and environmental policy development, the regulatory environment, and the needs of AECL's largest customer for research and development support.

The Panel was invited by Natural Resources Canada (NRCan) to prepare a report entitled "A Rationale for Canadian Expenditure on Nuclear Research and Development in the 21st Century", a shortened version of which appears as Chapter 2. The central argument contained therein has been adapted into a version suitable for wider distribution under the title "Vision 2020 and Beyond: The Need for Nuclear Research and Development in Canada in the 21st Century".

The contents of this Report fall under the following inter-related themes:

1. Strategic issues (Chapters 2 and 3), in which nuclear research and development is reviewed in the context of AECL's historic and current issues and with respect to the increasing importance that the Panel attaches to avoidance of greenhouse gas (GHG) emissions in energy production.
2. CANDU R&D issues are reviewed briefly in Chapter 4. Safety, licensing and computer codes discuss licensing processes with the AECB and the closure of Generic Action Items (GAIs) is addressed. The section on computer codes follows directly out of the most recently issued GAI concerning standards and quality assurance. The Panel recognizes the importance of codes, which represent a form of intellectual property management, and intends to follow up in future reports on this introductory review. Plant life management and life extension follows on from previous Reports concerning the behaviour of materials and components in use. Advances in CANDU technology have been significant and the Panel has updated earlier reports concerning advanced fuel cycles, new means of heavy water production, and the CANDU-X concept.
3. Partnerships for research and development are covered in Chapters 5, 6 and 7. AECL and the Canadian research community interact in many arenas. The respective challenges facing the Canadian Neutron Facility (CNF) and the Radiobiology and Health Physics Program at Chalk River Laboratories (CRL) are reviewed. In both cases, the resolution of the challenges will depend heavily on AECL maintaining close relationships with the appropriate academic communities. Finally, the Panel has reviewed the importance of AECL's relationships with universities as requested by the Science and Technology Committee of AECL's Board of Directors.

The Panel's views are summarized at the end of each chapter or section (in the case of Chapter 4) in a total of 22 recommendations.

The Panel membership was strengthened in 1999 through the appointment of two new members, Dr. Robin Armstrong and Dr. Gilles Patry, who joined in May.

The Panel wishes to acknowledge the excellent cooperation it has enjoyed with the many AECL staff who presented their work on request, provided additional materials when asked, and who were always helpful in response to our questions. We especially thank Barbara Gray and Marilyn Lloyd who clarified policies, facilitated our requests, identified sources of information and assured the infrastructure that is required to prepare a report. The preparation of this Report would not have been possible without their whole-hearted collaboration.

CHAPTER 2: RATIONALE FOR NUCLEAR RESEARCH AND DEVELOPMENT

2.1 INTRODUCTION

Maintenance of a high living standard for Canadians requires, among other things, the assurance of a reliable, robust and competitive energy supply. An assured energy supply for the nation is, and will remain, a primary requisite for sustained wealth creation. A major purpose of national energy policy must be to safeguard energy sources through prudent planning, development and diversification. Events such as the 1973 oil embargo illustrate the importance of ensuring that Canada will continue to enjoy an adequate, diverse, reliable and competitive energy supply.

Energy policy must take into account the resources available for energy production in the country. Canada has an abundance of hydropower, natural gas, petroleum and coal, and is the world's leading uranium exporter. One result of this abundance is that Canada enjoys a diverse mix of electrical energy sources quite different from that of most developed countries, with significant reliance on hydro and nuclear power, and much less reliance on fossil fuel power. This has benefited Canada by providing economical and reliable electricity with much lower emissions of GHG and other air pollutants than almost all other industrialized countries.

Nuclear power plants account for 14% of Canada's electrical power output at this time, most of this electricity being produced in Ontario. Nuclear technology has also benefited Canada in many other fields, including medicine, industry, agriculture, the environment and the home.

To ensure that Canadians can continue to enjoy the benefits of reliable, low-cost and environmentally benign electrical energy, as well as the many other benefits of nuclear technology, the Panel strongly believes that nuclear science and engineering must be developed and sustained as an integral part of Canada's high technology profile. Because of the economic, health and environmental benefits of nuclear technology, we urge that the Canadian investment in R&D in nuclear science and engineering be continued and strengthened.

2.2 HISTORICAL ACCOMPLISHMENTS OF CANADIAN NUCLEAR SCIENCE AND ENGINEERING

The excellence of Canadian nuclear science throughout the last half century has been internationally acknowledged in a variety of ways including:

- development of the CANDU reactor, one of only three currently viable power reactor technologies;
- development of MAPLE research and isotope production reactors;
- development of products, such as medical radioisotopes, that improve the quality of human lives;
- representation on international nuclear science bodies;
- participation in the control of nuclear weapons proliferation; and
- the award of a Nobel Prize.

Several tens of thousands of Canadians derive their employment directly or indirectly from the investment in Canadian nuclear science and engineering research. About 150 Canadian firms and 3,000 subcontractors, scattered across the country, benefit from each international CANDU sale. The distribution of these firms is exemplified by the manufacture of pump seals by Sulzer Canada in British Columbia, the mining of uranium by Cameco in Saskatchewan, the manufacture of steam generators by Babcock & Wilcox in Ontario, the construction of calandria assemblies by GEC-Alsthom Energies in Quebec, and the manufacture of nuclear reactor control equipment by Adtech Manufacturing in New Brunswick.

In addition to providing employment opportunities, nuclear science and engineering contribute to improvements in the quality of life for Canadians at every turn through the innovative products they make possible. For example:

- In power generation, CANDU reactors have produced many thousands of terawatt-hours of economical and safe electricity in Canada and other countries.
- In biology, isotopes have made the molecular revolution possible. The design of highly effective new treatments, based on an accurate understanding of life at the molecular level, is a direct result of the application of nuclear sciences to biology.
- In cancer care, the Cobalt-60 cancer therapy unit, developed in Canada, is still widely used around the world and especially in developing countries. Canada supplies about 80% of the cobalt sources used in these units. Canada also supplies two thirds of the world's reactor-produced radioisotopes for nuclear medicine, with which 20 million diagnostic tests are performed each year world-wide.
- In materials science and engineering, the development of neutron scattering techniques at Chalk River's NRU (National Research Universal) Reactor, which led to the Nobel Prize in physics for Dr. Bertram Brockhouse in 1994, has enabled some of the metallurgical and mechanical properties of components such as turbine blades to be determined rapidly and non-destructively.
- In agriculture, the sterile insect technique, in which Canada played a leading developmental role, has controlled the Codling Moth in British Columbia apple orchards and the New World Screw-Worm Fly infestation of cattle in Libya, and has eliminated the Tsetse Fly cattle pest on the island of Zanzibar. Cobalt-60 irradiators are also used for such diverse agricultural applications as the sterilization of infected beekeeping equipment and destruction of parasites in wool.
- In the mining industry, neutron activation analysis is used to obtain inexpensive and rapid analysis of ore samples.
- In the oil industry, well-logging by radioisotopes and pipeline radiography are important tools.
- In many manufacturing industries, from fine paper to jet aircraft, nuclear technology is used for radiography, process control and quality assurance purposes.
- In environmental protection, nuclear technology is used to detect and measure a wide range of industrial pollutants.

- In the food industry, irradiation of meats and fruits to sterilize, prolong shelf lives and prevent potentially lethal poisoning, is being increasingly recognized as beneficial. This technology was pioneered at AECL. It is now being used on produce, poultry, and red meats in the USA to reduce the number of illnesses, recently estimated at 33 million per year, that are attributable to microbial contamination of food.
- In the sterilization of medical devices, such as specialized catheters, surgical tools, sutures and prostheses, Cobalt-60 sources are widely used. Almost two thirds of the irradiators for all medical and agricultural purposes and their Cobalt-60 sources come from Canada.
- In homes, smoke detectors incorporating radioactive sources save lives.

The question arises whether the benefits of nuclear science research are now safely in hand and whether anything more is to be gained by continuing government support in these areas. There is ample evidence to show that the benefits still to be realized will be as significant as those already achieved.

Critics of the nuclear industry argue that Canada's legacy of radioactive wastes and Ontario Power Generation's (OPG) management problems with its reactors constitute examples of problems with nuclear technology. In fact, these problems have been addressed. The management and disposal of wastes has been extensively researched and publicly reviewed; the Federal Government had announced its intention to present its preferred option for dealing with wastes by the end of 1999. Ontario Power Generation, which had management problems with its reactors, is actively refurbishing its nuclear establishment and has developed a plan, according to which all its laid-up units will be returned to service beginning with the first Pickering A unit in 2001.

2.3 CURRENT AND FUTURE REQUIREMENTS OF NUCLEAR R&D

The perspective on nature that is provided by nuclear science will remain a vital benefit. The insights provided by nuclear science into the nature of matter will continue to open possibilities for and set limits on new technologies. The consequences of not supporting nuclear science research in Canada would be to create a dependency on other countries for this critical information and to reduce our industrial competitiveness, not only in areas that are overtly recognized as "nuclear", but also in many other areas. Most Canadians are unaware of both the extent to which the products of nuclear science support their daily lives, and the extent to which nuclear science is still capable of contributing to the future development of our economy.

For the future, the importance of nuclear science and engineering to the nation must be considered in the context of a wide spectrum of academic, agricultural, industrial, medical, and fundamental science pursuits. The need for non-polluting energy sources and for continuation of scientific studies into the basic structure of matter are but two of the compelling examples of pursuits. The fact that the nuclear industry and the universities have some common needs, requires that there be a national policy in which resources are shared, as will be the case with the proposed Canadian Neutron Facility.

2.3.1 Economic Issues

Up to 1990, for each (US) dollar spent on nuclear power R&D in Canada, 254 kWh of electricity had been produced in nuclear power plants, while the comparable figure in the USA was only 140 kWh. The Canadian ratio of electricity produced per R&D dollar spent is better than that of any other country with a significant nuclear power program. Thus, Canadian nuclear R&D funding has been used effectively.

Nuclear generation currently provides 14% of Canada's electricity, and about 48% in the case of Ontario, the province that accounts for 40% of the country's Gross Domestic Product (GDP). The contribution of nuclear electricity to GDP over the period 1962 to 1992 was $23 billion compared to government support of $4.7 billion from 1952 to 1992. Historically, the total unit energy costs of OPG's reactors have been less than those for coal-fired plants, although this has not been true for the past two years because of the poor reactor performance in Ontario, and the falling cost of fossil fuels. However, a recent NRCan study shows that electricity from new CANDU reactors would be competitive with that from combined-cycle gas turbine plants and coal-fired plants in central Canada. At a real discount rate of 5%, the total levelized unit energy costs [1] projected for new plants are:

CANDU 9 (2 x 880 MWe)	3.42 cents (Cdn)/kWh
CANDU 6 (2 x 665 MWe)	3.98
Combined Cycle Gas Turbine (2 x 750 MWe)	4.44
Coal (4 x 750 MWe)	4.31

Ontario Power Generation's costs of nuclear generation are likely to go down again as the laid-up reactors are brought back on line and operated at high capacity factors. OPG is determined to achieve the same success as the Tennessee Valley Authority in the USA, which has now brought all of its laid-up reactors back on line. In short, the continuation of nuclear generation from the existing plants throughout their lifetimes and the construction of new plants will continue to be economical.

As the existing CANDU plants age, they continue to need R&D support so that the behavior of irradiated materials and components can be monitored to ensure safe and economic operation and to cope with unexpected events. An example of the close support provided by R&D and of the economic importance of that support is provided by the fuel bundle end-plate cracking encountered in the first two years of operation of the Darlington Nuclear Generating Station. Engineers and scientists from AECL and the utilities modeled and characterized the problem and initiated corrective action within a short time. At Darlington, failure to resolve the problem would have put the multi-billion dollar project in jeopardy. This pace of resolution would not have been possible without the involvement of skilled engineers and scientists at AECL and the utilities with a profound understanding of both the fundamental properties of materials and reactor operating principles backed up by AECL's research facilities.

Considerations of plant life maintenance, of plant life extension, and of the maintenance of an adequate margin of safety all require continued R&D support. The past strong emphasis by the utilities on the short-term economic performance of the stations seems to have been at the expense of this essential long-term perspective. It is not evident that the utilities have sufficient

R&D resources to undertake problem solving at the basic level, and the onus now is on AECL to maintain sufficient R&D expertise to deal with issues as they arise. Ontario Power Generation's R&D resources are being rapidly eroded, while Hydro Quebec and New Brunswick Power have always been dependent on AECL. The Canadian investment in nuclear power will be at risk of being prematurely written off if the short-term view is allowed to persist.

In the USA, the 60-year reactor is becoming a competitive reality. In Sweden, a country that has publicly announced that it is exiting from nuclear electricity generation, Westinghouse has recently been awarded a five-year contract for the upgrading of the Ringhals reactors to permit their continued operation. For CANDU to achieve similar life-extension targets, additional R&D by AECL and the utilities will be necessary.

2.3.2 Environmental Issues

The importance of nuclear generation of electricity for minimizing or reducing the emission of GHG is discussed at length in Chapter 3. Here, we will only reiterate that Canada will not be able to meet its Kyoto targets for 2010 without greater reliance on nuclear generation, and that other nations will be assisted toward their targets if they can acquire nuclear generation in place of fossil-fueled plants. The CANDU product needs to evolve in response to the rapidly changing economic and geo-political environment if it is to continue to be an affordable option for Canada and AECL's international CANDU customers.

2.3.3 Regulatory Issues

Nuclear R&D capability is a requirement for the licensing and safe operation of nuclear plants throughout their lives. The AECB requires that licensees have the demonstrable capacity to perform the R&D essential to safe operation of nuclear plants in Canada. AECL's facilities have served as a shared resource for the utilities through which questions from the regulator can be addressed. The AECB has only a small budget for research, some of which is used to contract research at these facilities. In any proposed new arrangement, it will be essential that safety-related research continue to receive support. A great deal of the safety and licensing R&D has been done at the Whiteshell Laboratories. The closure of that facility necessitates that essential components be relocated to CRL and that the significant costs incurred in that transition be recognized.

2.3.4 Social and Political Issues

The Government of Canada has used its nuclear expertise to advantage in international diplomacy. Canada is a member of the G-7, a position from which it can contribute broadly to the development of the world community and, specifically, can contribute its expertise in nuclear science both to make the world safer and to improve the well-being of specific societies.

- Foreign policy initiatives, such as the proposal to destroy weapon-grade plutonium in CANDU reactors, are only possible because there is a nuclear program in Canada. It is highly improbable that Russia would hand over its plutonium inventory for destruction in the USA. It is, however, likely to agree to have it destroyed, along with American plutonium, in a third

country such as Canada. There is a public misperception of the nature of the plutonium fuel, which will be a solid mixture of plutonium and uranium fabricated in Russia and in the USA.

- One of the major economic needs of developing nations is fresh water. CANDU reactors could provide desalination on a scale sufficient for the agricultural, industrial and personal needs of large populations. A reliable fresh water supply might well be the means of stabilizing strategically positioned developing societies through the resulting improvements in their agriculture and human well-being.
- The World Bank projects that the world's population will increase at 1.4% per year to reach seven billion by 2010. Both the additional one billion persons, plus the one billion who currently live in abject poverty, will require energy sources to meet their needs. The energy needs of these rapidly growing populations will be great as they develop their infrastructures. Nuclear energy will be one of the contributors to solutions for the development and stabilization of impoverished and rapidly growing societies. In 1997, the International Atomic Energy Agency (IAEA) forecast that electricity production from nuclear plants would reach over three times the current production rate by 2050 [2].
- In accordance with Canada's commitment to the Treaty on Non Proliferation of Nuclear Weapons, Canada contributes approximately $2 million a year in support of international safeguards R&D. Most of this work is done at CRL.

2.3.5 The Evolving CANDU Reactor

To ensure that CANDU reactors remain competitive, AECL is working to reduce capital and operating costs of future CANDU designs, through R&D on advanced fuel cycles and fuel bundle designs, improved fuel channels, new technologies for heavy water production, and new developments in information technology and plant constructability. Enhanced safety for these designs will result from R&D to resolve generic safety issues and from passive safety features. Necessary improvements in the performances of steam generators and other non-reactor components will also continue to require some R&D.

In the longer term, to remain competitive AECL must develop advanced CANDU designs incorporating features to lower unit capital and unit operating costs by 50%. To meet these challenging targets, AECL is investigating such features as direct thermodynamic cycles, thus avoiding the need for costly steam generators; new higher temperature coolants, to increase cycle efficiency as well as to reduce capital costs; and fuel channels to accommodate the higher temperature coolants. In the international market, new CANDU designs must compete against new light water reactor (LWR) designs, based on R&D done in the national laboratories of countries such as the USA, France, Germany and Japan. CANDU competitiveness in the international marketplace will be handicapped if it is evident that AECL does not have similar R&D support in Canada.

To ensure that Canada has adequate energy in the 21st Century will require approaches that not only recognize supply, technical, economic, and environmental realities, but that also develop new thinking about traditional ways of meeting the various demands for energy services. The concept of electricity and hydrogen as energy currencies that link energy sources, conversion technologies, and service technologies to the energy services needed by the population, can be

the basis for this new thinking. Such an approach opens possibilities for nuclear energy to meet the needs of energy sectors such as transportation and desalination, to which it has not traditionally contributed. These are discussed at more length in Chapter 3.

2.3.6 A Vital Nuclear Facility

A vital element in the continued support of CANDU R&D is the replacement by 2005 of the NRU Reactor by a new research reactor, the CNF. This is discussed at length in Chapter 5.

2.4 HOW SHOULD CANADIAN NUCLEAR R&D BE STRENGTHENED?

In many countries the model for successful nuclear R&D programs is that of the National Laboratory, which serves as the developer and custodian of the nation's intellectual knowledge. In these countries the support given to the National Laboratories goes beyond simply supporting the laboratory infrastructure; it also ensures government funding for activities that are directly in the national interest, such as the health effects of radiation, dosimetry and health physics programs, safety, and environmental protection. It is particularly important that there should be support for such activities in Canada since the CANDU technology is unique. In the past, AECL served as a National Nuclear Laboratory. However, in recent years it had to give up those responsibilities and some of the associated funding in order to focus on its role as the CANDU vendor. Although its responsibilities for non-CANDU R&D have largely ended, AECL continues to carry the responsibility for decommissioning facilities that formerly served other purposes and for management of wastes that were generated in pursuit of missions that were not related to CANDU.

The funding, albeit reduced in amount, that AECL now receives from the Government is viewed in some quarters as an unfair subsidy of the CANDU business, a business that should flourish or fail on its own merits. That argument is not without merit when considering the business of selling and supporting the current CANDU product. However, it is the view of the Panel that subsidies, properly used, can be valuable tools of government to support public goals that have a time constant longer than can be sustained in the marketplace. In this sense, subsidies are long-term investments in future technology. The R&D required to support the design of the nuclear stations of the future, not unlike the aircraft and medical treatments of the future, needs decades to achieve results. In all such areas, when the time for development is long or the outcome, while desirable, is too uncertain to define the product for the marketplace, a form of subsidy is necessary to sustain the vision. Thus, there always will be aspects of nuclear science and technology in which public investment will continue to be necessary.

In view of all the present and anticipated future societal and economic benefits of nuclear technologies, the Panel, in the strongest possible terms, supports the continuation of nuclear science and engineering R&D funding. Some changes need to be made so as to factor future government support into specific categories with clarified lines of accountability. The current mechanism of funding AECL has become counter-productive in that it has isolated nuclear science in Canada from science in general.

The funding that AECL currently receives, nominally for R&D, actually includes responsibility for at least six different types of activities:

- management of obsolete nuclear facilities and of high-level radioactive waste resulting from former collaborations with American and British governments, as well as from the production of medical isotopes;
- some of the R&D required by the AECB for licensing of nuclear facilities and for the assurance of public safety;
- R&D concerning environmental and biological effects of low levels of ionizing radiation;
- some of the R&D that was formerly supported by the nuclear utilities under the CANDU Owners Group (COG) partnership for operational support;
- short-term R&D in support of immediate business objectives; and
- long-term R&D in support of future advanced reactor designs or of novel applications of CANDU technology.

The progressive reductions of both government and utility funding to AECL in recent years combined with AECL's largely fixed obligations for facility management have put its R&D functions under progressively greater limitations and strain. An improved mechanism of government funding would make distinctions between the CANDU business and historical issues, as well as among business-related, longer-term and public-interest R&D issues.

2.5 RECOMMENDATIONS

Recommendation 1

The Panel recommends to AECL that negotiations with the federal government and utilities for future R&D funding should continue to take cognizance of the following:

1. Responsibilities for managing wastes from historic obligations and the production of medical isotopes, as well as for obsolete nuclear facilities, should be funded separately from the CANDU business, whether these responsibilities continue with AECL or are given to a new site-management agency.
2. Funding of R&D that is required of licensees by the AECB for licensing and safety purposes, and which is largely performed at AECL's unique facilities, should be assured through mechanisms that do not burden the CANDU business beyond the extent to which they are required for that business. It is the Panel's opinion that AECL, the AECB, NRCan and the nuclear utilities have a shared interest in ensuring that this is done. Each party should accept a share of the associated costs and the utility partners should be encouraged to seek tax credits for their expenditures in this research.

3. Research concerning nuclear science that is in the public interest, such as environmental and health effects of low doses of ionizing radiation, should be reviewed and funded through processes that guarantee the independence of the researchers from the CANDU business and ensure their accountability through peer-reviewed processes such as those that apply to research funded by the Natural Sciences and Engineering Research Council (NSERC) and the Medical Research Council.
4. AECL and the nuclear utilities should develop their natural partnership in R&D for operational support, plant life maintenance and life extension issues. There will be some long-term issues that are difficult to address through a business plan. Governmental funding of such long-term work should continue with an appropriate mechanism of accountability for its development. Utilities should seek to obtain a tax credit for their participation.
5. AECL should fund its short-term R&D, as it relates to current products and immediate business prospects, from the revenues of the CANDU business.
6. Continued public funding of long-term and basic nuclear R&D should be structured within the framework of Canadian science funding in general. This has already been done for the Materials Science Program, formerly an AECL activity, which has been transferred to the National Research Council (NRC).

2.6 REFERENCES

1. B. Moore and S. Guindon, Natural Resources Canada, Comparative Costs of Electricity Generation: A Canadian Perspective, CNS Bulletin, Volume 19, No.2, pages 12to15, April-June 1998.

2. Global Energy Outlook, Key Issues Paper No. 1: International Symposium on Nuclear Fuel Cycle and Reactor Strategy: Adjusting to New Realities, International Atomic Energy Agency, IAEA SM-346, May 1997.

CHAPTER 3: CANDU REACTORS AND THE ENVIRONMENT

3.1 INTRODUCTION

There is much concern in the world today about global climate change and the role of GHG in this phenomenon. While there has been in the past considerable debate about this issue, the scientific consensus is now clear: increasing emissions of GHG, particularly carbon dioxide (CO_2) from the burning of fossil fuels, are causing increasing global temperatures which will, without mitigative actions, lead to global climate change with resulting severe social and economic consequences [1, 2].

Amongst the evidence for this conclusion is a very strong correlation between the growth of the consumption rate of fossil fuels, i.e., carbon-based fuels, and the increase in CO_2 concentration in the atmosphere from about 1850 to the present [3].

Growing concerns about global climate change have led to a number of international conferences, decisions and agreements over the last twenty years or so. These activities culminated in an international conference on global climate change in Kyoto, Japan, in 1997, at which developed countries pledged to reduce GHG emissions to levels below those of 1990. Under the Kyoto Protocol, Canada has undertaken to reduce GHG emissions in the period 2008 to 2012 to six percent below Canadian emissions in 1990.

There are some who claim that the link between global warming and fossil-fuel consumption has not yet been scientifically demonstrated. This view is generally related to concerns that unwarranted restrictions on the use of fossil fuels, based on an unproven hypothesis, will themselves have disastrous economic and social consequences. However, prudence demands that the possible effects of CO_2 and other GHG emissions be taken into account because they are almost certain to be catastrophic should significant global climate change occur.

Since nuclear power plant operation does not produce GHG emissions, nuclear energy provides one means of meeting the energy needs of an industrialized society without adding to the atmospheric burden of GHG. Thus, the global climate-change issue presents an opportunity for extending the operating life of existing nuclear power plants and for promoting the future growth of nuclear energy to meet the increasing energy needs of the world.

Other environmental issues, i.e., the control of releases of radioactive substances, the management and disposal of discharged nuclear fuel and the decommissioning of nuclear facilities, have been covered in previous Panel Reports and are not considered here. However the Panel reiterates its previous conclusions that these matters are being managed appropriately.

3.2 GREENHOUSE GAS EMISSIONS AND CANDU

3.2.1 Greenhouse Gas Emissions in Canada and the Role of CANDU Reactors

The major contributors to GHG in Canada are carbon dioxide (CO_2, 77%), methane (CH_4, 12%) and nitrogen oxides (NO_x, 10%). Greenhouse Gas emissions are mainly caused by energy activities (78%), made up of energy end-use (59%, mostly from transportation), electricity production (17%) and fossil-fuel supply (12%) [4]. In Canada, electricity production is a considerably smaller contributor to GHG emissions than in most developed countries because about 80% of Canada's electricity is produced in hydro and nuclear power plants, which do not emit GHG. However, this does not mean that further reductions of GHG emissions from electricity production in Canada would be insignificant, as we will see.

The total emissions of GHG in Canada in 1990 are estimated to have been about 600 million tonnes (Mte) of which about 450 Mte was CO_2. Present trends indicate that CO_2 emissions will reach a level as high as 540 Mte/yr by about 2010, if no mitigative measures are taken. Under the Kyoto Protocol, Canada has committed to reduce GHG emissions to 6% below 1990 levels by 2010, equivalent to a reduction in CO_2 emissions of about 120 Mte/yr below the "business-as-usual" case in 2010.

A typical coal-fired power plant in eastern Canada would emit about 8 kilotonnes of CO_2 per megawatt-year. Therefore, a CANDU 6 operating at 80% capacity factor, as an alternative to a coal-fired plant of the same size and capacity factor, would avoid about 4.5 Mte/year of CO_2 emissions. Based on such an analysis, CANDU power plants in Canada have avoided emissions of over 1,000 Mte of CO_2 since the first plant came on line in the 1960s, because coal-fired plants would probably have been built if nuclear power had not been available. At present, even with the Pickering-A and Bruce-A plants laid up, nuclear power plants in Canada are avoiding about 70 Mte/yr of CO_2 emissions. It is obvious that Canada would have a much more difficult task in meeting its Kyoto commitments without the continuing contribution of nuclear power. Furthermore, it is essential for this purpose that the laid-up reactors be brought back on line as early as possible, since the replacement power is all fossil-fueled[1]. Up to an additional 30 Mte/yr of CO_2 emissions would then be avoided, a significant contribution to the total reduction needed.

It must be remembered that, in addition to CO_2 emissions, fossil-fueled power plants emit other atmospheric pollutants, particularly sulphur and nitrogen oxides, which contribute to acid rain and smog. The lay-up of Ontario's reactors and their replacement by fossil fuel-fired generation has caused a significant increase in emissions of these pollutants. In 1998, following the lay-up of the Pickering-A and Bruce-A nuclear power plants, sulphur oxide emissions increased 15% and nitrogen oxide emissions increased 30% over 1997 values.

---

[1] The GHG avoidance will be less for gas-and oil-fired power plants than for coal-fired plants, because of lower concentrations of carbon in those fuels compared to coal. The Panel has estimated that a CANDU-6 would avoid about 2.5 Mte/yr of CO_2 emissions compared to a conventional gas-fired steam power plant and about 1.7 Mte/yr compared to a higher-efficiency gas-fired, gas turbine combined-cycle plant, both of the same size and capacity factor. These estimates do not include the additional GHG emissions from the production and transmission of the natural gas fuel.

3.2.2 Kyoto Protocol Mechanisms and the Export of CANDU Reactors

Under the Kyoto Protocol mechanisms, Canada may obtain GHG credits for CANDU exports, to be shared with the customer country, although the details are yet to be worked out. Arrangements such as these would help Canada to meet its Kyoto commitments while gaining economic benefits.

International reactor sales since 1990 can be eligible for such benefits, so the recent sales of CANDU reactors to Korea and China will qualify. Assuming that coal-fired plants would have been the alternative if the CANDU plants had not been built, Wolsong units 2, 3, and 4 and the two units at Qinshan will be avoiding about 23 Mte/yr of CO_2 emissions by 2004; credit for a portion of this avoidance should be available to Canada to help offset its Kyoto commitments. Sales of CANDU reactors to Korea, Turkey and Romania, should they materialize, will also qualify for credits. Large populous countries such as China and India will continue to be the world's major atmospheric polluters; these and many other developing countries are still building coal-fired power plants on a large scale[2]. It is in Canada's environmental, as well as economic, self-interest to encourage these countries to include nuclear power in their energy mix.

3.2.3 Government Actions on Kyoto Commitments

The federal and provincial governments have agreed on procedures for developing policies to enable Canada to fulfil its Kyoto commitments. A Climate Change Action Fund was established in 1998 with a budget of $50 million per year for three years, under the joint responsibility of the federal Ministers of Environment and of Natural Resources. The main objectives of the fund are to lay the foundation for a national implementation strategy and to initiate early action to reduce GHG emissions. Activities began in April 1998 and are proceeding rapidly.

A key part of the activities so far has been evaluations, under "Issues Tables", of the various issues involved on a sectoral basis, e.g., agriculture, electricity and transportation, and on a mechanism basis, e.g., analysis and modeling, science and application, and technology. These evaluations are being made by teams composed of various stakeholders. For each of these issues, a "Foundation Paper" is available which summarizes the current state of the issue and outlines challenges, opportunities and, where applicable, best practices. The Foundation Papers are to be followed in the fall of 1999 by "Options Reports", summarizing options, emission-reduction potentials, risks, costs and benefits and other factors. In addition, NRCan is undertaking a program "Energy Technology Futures 2030", to develop a set of visions of Canada's energy system in 2030 to 2050, and to identify long-term technological options that could fundamentally alter the relationship between economic growth and GHG emissions. Eventually, all these activities will lead to a National Implementation Strategy planned for release in 2000.

---

[2] The installed electrical capacity in China is projected to increase from 210,000 MW in 1995 to 3,000,000 MW in 2000, with the great majority of the new plants being coal-fired. See Mechanical Engineering Power, American Society of Mechanical Engineers, November 1997.

In these activities, AECL and the nuclear industry, represented by the Canadian Nuclear Association, have been most involved in the Electricity Table, on which the utilities are represented, the Climate Change Technologies Table, on which AECL is represented, and in the Kyoto Mechanisms Table. *It is essential that the importance of nuclear power as a key option for the reduction of GHG emissions is recognized clearly in the appropriate Options Reports and in the Energy Technology Futures 2030 program.*

3.3 ELECTRICAL ENERGY PROJECTIONS AND IMPLICATIONS FOR CANADA

In 1997, NRCan published a "reference outlook" for Canadian energy supply and demand and for GHG emissions from 1995 to 2020 [5]. It is emphasized that the outlook is not a forecast; amongst other things the energy, environment and related policies of the federal and provincial governments are assumed to remain constant over this period, and the real costs of fossil fuels are also assumed to remain constant. The intention of the outlook is to provide a base against which to assess the need for, and form of, additional policy measures.

NRCan projects a growth rate of 1% per year in total electricity demand in Canada over this period, a significant reduction from the 2.6% per year experienced over the previous 15 years. It foresees that all existing reactors, except Bruce-2, will be re-tubed to ensure a total life of 40 years for each, that these reactors will not be replaced by nuclear units at the ends of their lives, and that no new nuclear capacity will be built. This scenario implies that the contribution of nuclear electricity in Canada will decline from about 19% in 1995 to 10% in 2020. The scenario is also based on no new large-scale hydro developments, except for the beginning of a project in Quebec in 2019, on most replacement and new capacity being provided by natural gas (combined cycle and co-generation) and coal-fired (using "clean coal" technology) plants, together with the refurbishment of existing fossil facilities and the re-development of some hydro facilities. Finally, it foresees that renewables will provide a total of about 3% of electricity demand in 2020.

The NRCan projection, with its increasing reliance on fossil fuels for electricity generation and its neglect of new nuclear and limited new hydro generation, coupled with increased use of fossil fuels for transportation and industry, inevitably results in significant increases in GHG emissions, rather than the desired decreases. *The total GHG emissions are projected to be 19% higher in 2010 than in 1990, rather than 6% lower, as committed to at Kyoto. In addition, GHG emissions would be 36% higher in 2020, with emissions from electricity generation projected rising significantly after 2010, when some of the nuclear generation is retired and replaced by fossil-fuel generation. It is evident that such a scenario is not environmentally acceptable.*

Recently, the National Energy Board (NEB) has developed energy scenarios for Canada which make assumptions similar to those of NRCan, e.g., no replacement or new nuclear power, but higher electricity growth rates of 1.2% to 1.6% per year, and reaches similar conclusions, that is, significant increases in GHG emissions by 2025 [6]. Again, this is not an acceptable scenario.

It is clear that the GHG emissions strategies being developed for Canada, must include a recognition that the currently laid-up reactors must be returned to service as soon as possible, and that new nuclear capacity must be planned if Canada is to meet its Kyoto commitments and to control GHG emissions beyond 2010. Other means of GHG avoidance, such as renewable energy sources, improvements in efficiency of energy production, and use and sequestration of CO_2 in underground reservoirs, will not together achieve the Kyoto target and ensure further reductions beyond 2010.

It is interesting to compare these NRCan and NEB scenarios with the views of the US Department of Energy (DOE), the US counterpart of NRCan. In a report on the potential economic impact of the Kyoto Protocol, the DOE states that the United States must extend the operating licenses of existing nuclear plants and build 40,000 MW of new nuclear capacity if it hopes to meet its Kyoto target of GHG emissions 7% below 1990 levels by 2012 [7].

3.4 EXTENDED APPLICATIONS OF CANDU REACTORS

3.4.1 Non-Electric Applications of CANDU

As pointed out in the 1997 Panel Report, the CANDU reactor up to now has been used mainly for electricity generation. The only exception was OPG's Bruce-A plant, which produced steam for heavy water production and for agricultural product heating purposes, in addition to generating electricity. In other countries, nuclear reactors have been used for district heating and for some industrial process heating. Nevertheless, on a world-wide basis, less than 1% of the heat generated in nuclear reactors is used for purposes other than electricity generation.

At present, about one-third of the world's energy consumption is used for electricity generation, 17% of which is produced by nuclear plants. Nuclear electricity has already contributed significantly to the reduction of GHG emissions in many countries, as discussed in Section 3.2.1 above for Canada. It has been estimated, as noted in Section 6.3 of the 1997 Panel Report, that the world's nuclear power plants are avoiding about 2,600 Mte/yr of CO_2, and also many megatonnes per year of associated sulphur and nitrogen oxides, assuming that coal-fired plants would have been built if nuclear plants had not been available.

However, if nuclear energy is to provide more than a relatively small fraction of the world's total energy requirements in the future, and is to contribute in more than a modest way to the reduction of GHG emissions, it is evident that non-electric, as well as electric, applications of nuclear reactors will have to be pursued.

Non-electric applications that can be considered for CANDU reactors include:

- district heating: studies by AECL and others have shown the feasibility of using CANDU reactors for this purpose;
- industrial and chemical process heating: CANDU reactors have already been used for process heating at the Bruce-A plant as noted above;

- de-salination of sea-water: a preliminary study by AECL has demonstrated the economic benefits of a combined-purpose CANDU providing electricity and potable water (obtained from sea-water by a reverse-osmosis process); and
- petroleum recovery from the Alberta Tar Sands: recent developments appear to make CANDU reactors feasible for petroleum recovery from tar sands.

In general, the most cost-effective approach to these uses would be by using combined-purpose plants, i.e., a plant combining electricity generation with another application. This is generally referred to as co-generation.

Such applications for CANDU reactors would contribute to the avoidance of GHG emissions in Canada, but are not considered in the NRCan and NEB reports discussed earlier. There are opportunities for exports of CANDU reactors for these other purposes, which could help meet Canada's Kyoto targets, and also produce economic benefits. For example, many developing countries that border on oceans or seas suffer from serious shortages of fresh water. It should be noted that the IAEA is actively promoting the use of nuclear energy for desalination in such countries [8]. Thus, there exists a potential market for CANDU reactors for desalination of sea-water as well as electricity generation.

A major potential opportunity for wider application of CANDU reactors and additional avoidance of GHG emissions is discussed in the following section.

3.4.2 Hydrogen and Nuclear Energy

In Canada, about 25% of end-use energy demand is for transportation purposes, almost all based on oil products. Nuclear energy makes practically no contribution to this sector, except for its contribution to the very small amount of electricity used in urban and suburban mass-transportation systems. However, an attractive new opportunity presents itself to AECL: the use of nuclear-generated electricity to produce hydrogen by electrolysis for use in fuel cells to power trains, buses, trucks and cars, as described by R.B. Duffey et al. [9]. The Panel considers this paper to be very important in providing a vision for the future and has reviewed it in detail. The Panel agrees with the main results obtained in the paper, which it has confirmed independently, and strongly supports its major conclusions.

Hydrogen used in fuel cells to propel vehicles is often touted as a major route to the reduction of GHG emissions. However, environmental problems associated with the production of hydrogen are generally ignored in such assessments. At present, hydrogen is almost always produced commercially by steam-methane reforming, in which natural gas from conventional gas wells is combined with steam generated in conventional fossil-fired boilers to produce the hydrogen. The recovery of natural gas from wells, its transportation in pipelines, the operation of the boilers and the reforming process itself are all accompanied by the emission of GHG, as well as other atmospheric pollutants. Therefore, while the end-use of hydrogen in the fuel cell may cause no significant GHG emissions[3], its production from natural gas certainly does. In fact, an analysis reported by Duffey et al. shows that the overall annual CO_2 emissions would be greater from a hybrid fuel-cell vehicle provided with hydrogen by this route

[3] Actually, water vapor, the only emission product from a fuel cell, is also a greenhouse gas. However, its saturation behavior prevents it from building up in the atmosphere.

than from a conventional gasoline-powered vehicle; there would not only be no advantage, but actually a disadvantage, in using hydrogen in fuel cells to reduce vehicle emissions, if this route were followed to produce the hydrogen.

On the other hand, hydrogen can be produced by the electrolysis of water, using electricity to break it down into its components. Not only does this process yield hydrogen without the emission of GHG or other atmospheric pollutants, but it also yields the valuable by-products, oxygen and heavy water. To ensure that the entire cycle for the production of hydrogen is GHG-free, the electricity must come from a non-GHG emitter, such as nuclear, hydro, wind or solar. Since this would be a new market requiring new electrical capacity, and since the opportunities for large new hydro developments are limited in Canada, nuclear reactors are the only practical electricity source that could produce electricity on a large scale for this purpose.[4]

Duffey et al. have calculated the hydrogen production from a centralized commercial-scale electrolysis plant provided with electricity from a dedicated CANDU 6 reactor. For an electrolysis plant operating at 70% efficiency and a CANDU 6 operating at 80% capacity factor, about 97 kilotonnes of hydrogen per year would be produced. In addition, the electrolysis process also produces, as valuable by-products, about 95 te/yr of heavy water and about 770 kte/yr of oxygen. Alternatively, hydrogen could be produced locally in small electrolysis units using off-peak power from general-purpose CANDU reactors or other non-GHG emitting sources.

Based on data for annual driving distances for cars and light trucks in Canada, and on calculations of the annual hydrogen requirements for such vehicles powered by fuel cells, Duffey et al. also show that one CANDU 6 operating at 80% capacity factor could supply the hydrogen needed for about 660,000 fuel-cell vehicles. Assuming a program of 20 new CANDU 6 reactors dedicated to this service, a total of about 13 million vehicles could be supplied; for comparison, the total number of cars and light trucks in Canada was about 15.5 million vehicles in 1995.[5] Assuming that the 20 new CANDU 6 reactors are introduced at a rate of one per year, beginning in about 2005, and that a fleet of 13 million fuel-cell vehicles is built up gradually, Duffey et al. show that CO_2 emissions from cars and light trucks would be reduced by about 45 Mte/yr by 2020, and by about 80 Mte/yr by 2030, compared to the emissions from vehicles powered by conventional gasoline engines.

Of course, many challenges remain, including the development of economical, reliable and safe fuel-cell vehicles, and the infrastructure to provide economic, convenient and safe fueling and servicing of these vehicles. There are many difficulties and uncertainties associated with the economics of such a fundamental change, including those associated with the significant capital investment required for vehicle manufacturing, hydrogen production and distribution, and nuclear power plants. Nevertheless, preliminary analyses suggest that costs to the individual of fuel-cell vehicles and their operation would be reasonable.

---

4 Renewable energies, such as wind and solar, suffer from two major inherent deficiencies for use as reliable large-scale suppliers of electricity - low intensity and intermittency. To use such sources on a reliable, large-scale basis in Canada would require large land areas, large quantities of materials and large storage capacities, all involving significantly high costs. The only potentially feasible use of such sources is to supplement nuclear and hydro for electricity generation for hydrogen production on a limited local, as-available basis.

5 Actually, more than 13 million vehicles could be supplied, since off-peak power from general-purpose CANDU® reactors could be used for electrolysis of water.

As an enabling step in this direction, AECL has suggested that some of the difficulties associated with the conversion of the multi-owner private vehicle sector to fuel cells could be avoided by the conversion of railroads from diesel locomotives to fuel-cell powered locomotives [10]. Of course, further opportunities for the abatement of CO_2 emissions exist in other areas of commercial transportation, such as large trucks and buses.

We see that exciting opportunities exist for the potential conversion of Canada's transportation systems from a fossil-fuel base to an electrolytic-hydrogen base. Canada has all the essential elements to be a major participant in a world revolution in the development of non-polluting transportation. Canada has CANDU power plants to produce the electricity for the high-efficiency electrolyzers produced by Stuart Energy Systems (formerly Electrolyzer Corporation) to provide hydrogen for the world-leading fuel-cell technology of Ballard Power Systems to power cars, trucks, buses and trains. With the advantages resulting from pioneer roles in these leading-edge technologies, Canada would be in an excellent position to exploit world markets in these areas.

3.5 INTERNATIONAL VIEWS ON NUCLEAR ENERGY AND CLIMATE CHANGE

As noted in Section 6.3 of the 1997 Panel Report, it is estimated that the world's nuclear power plants are now avoiding about 2600 Mte/yr of CO_2 emissions, as well as millions of tonnes of sulphur and nitrogen oxides. Based on such observations, there is wide international recognition of the vital role of nuclear energy in coping with the global climate change issue. Some views are summarized here.

The Royal Society and the Royal Academy of Engineering have recently completed a study on the future of nuclear energy in the United Kingdom [11]. They concluded that it is vital to keep the nuclear option open as one of the approaches to mitigating the threat of drastic climate change, and that nuclear power plants must be included in electrical power planning for the UK. In addition, they considered a proposed UK energy tax as being deeply flawed, since it did not distinguish between energy sources with different levels of CO_2 emissions; they favoured a carbon tax instead. Finally, they recommended that an international body be formed, supported by individual nations on the basis of their gross domestic product and energy consumption, to fund research on energy in the context of global climate change.

The Atlantic Council of the United States, a non-partisan network of leaders in the policy, academic and corporate communities, has recently completed a major study on the global role of nuclear energy [12]. One conclusion of this study is that nuclear power facilities should be given credit for their contribution to the reduction of GHG, and that governments should ensure that the full external costs of all forms of electricity generation are incorporated in electricity rates. The Council also concluded that governments should take the lead in long-term R&D needs for all energy options.

Several other groups and bodies, including the Nuclear Energy Institute (USA), the US President's Council of Advisers on Science and Technology, the Club of Rome, and a Group of American Nobel Laureates in the Sciences, have expressed concern about GHG emissions and other environmental effects of fossil-fuel combustion, and have identified nuclear power as a key element in any strategy for reducing such emissions.

3.6 SOME CANADIAN VIEWS ON NUCLEAR ENERGY AND CLIMATE CHANGE

A Conference on the Future of Nuclear Energy in Canada, organized by the Carleton University Research Unit on Innovation, Science and the Environment (CRUISE) was held in Ottawa, September 30 to October 1, 1999. A consensus emerged from the Conference that the future of nuclear energy in Canada will be determined by the interplay of several interacting factors, including most prominently:

- the consequences of deregulating the electricity market, especially in Ontario, which will focus the industry on short-term returns on investment;
- the ability of AECL to reduce the capital costs and construction periods of new CANDU plants;
- political decisions taken in Canada to achieve GHG abatement to meet the Kyoto targets and long-term objectives;
- essential modifications of the nuclear regulatory processes to accommodate rapid change in the electricity market; and
- the degree of public acceptance of the nuclear option.

There was also general agreement that existing CANDU plants will continue to be competitive producers of electricity.

The conference and other meetings during 1999 indicate to the Panel that others also recognize that nuclear energy is a vital element in dealing with the problem of climate change and remains a viable technical option.

3.7 CONCLUSIONS

It is evident from the foregoing discussions that nuclear energy must play a significant role in Canada's efforts to meet its Kyoto commitment of a six percent reduction in GHG emissions below 1990 levels by about 2010. It is evident from the NRCan and NEB projections that Canada will not be able to meet its Kyoto target without the laid-up OPG reactors being returned to service, the lifetimes of existing reactors being extended and new nuclear capacity being built. The new nuclear capacity would be used to phase out coal- and oil-fired plants, to meet new electrical demands and to meet non-electric applications for nuclear energy.

In addition, the synergism of nuclear power and hydrogen opens up exciting opportunities for Canada to play a leading role in a revolution in world transportation in which fuel-cell powered vehicles replace gasoline- and diesel-powered vehicles, all based on Canadian-developed technologies: CANDU reactors, Stuart electrolyzers and Ballard fuel cells.

Several respected international bodies, including the Royal Society and the Royal Academy of Engineering of the UK and the Atlantic Council of the United States, have concluded that, to deal with the issue of global climate change, nuclear power must play a significant role in future energy plans.

In Canada, the climate change issue presents AECL with new opportunities for access to R&D funding relating to the role of nuclear energy in meeting Canada's Kyoto commitments, and in coping with GHG emissions beyond 2010.

The Panel strongly supports AECL's participation, in cooperation with the Canadian Nuclear Association, in the climate change activities of the Federal Government with the purpose of ensuring that nuclear energy is, and remains in the future, a key part of the Federal Government's implementation strategy for dealing with Canada's Kyoto commitments and ongoing climate change issues.

The Panel strongly supports AECL's cooperation with Canadian industry in the development of electrolyzers and its support of research and studies related to the electrolytic production of hydrogen for use in fuel cells.

3.8 RECOMMENDATIONS

Recommendation 1

The Panel recommends that AECL continue to co-operate with NRCan in the development of the Energy Futures 2030 program to ensure that nuclear energy is recognized as a key component of future energy supply in Canada, and that this recognition is reflected in future energy scenarios.

Recommendation 2

The Panel recommends that AECL give a high priority to investigating the possibilities of obtaining R&D funding from other agencies related to the role of nuclear energy in coping with the issues of global climate change, including the use of CANDU reactors for the electrolytic production of hydrogen.

Recommendation 3

The Panel recommends that AECL continue to assess the potential in Canada and abroad for non-electric application of CANDU reactors, particularly for sea-water desalination, and identify and support, as appropriate, the R&D necessary to pursue such applications.

Recommendation 4

The Panel recommends that AECL explore co-operation with other organizations in international efforts for R&D related to energy and global climate change, such as those proposed by the Royal Society and the Royal Academy of Engineering of the UK and the Atlantic Council of the United States.

3.9 REFERENCES

1. Intergovernmental Panel on Climate Change, Working Group III, Summary for Policy Makers, Second Assessment Report, August 1996.

2. R. van Berkel, A Primer on Climate-Relevant Technology Transfer, International Energy Agency, May 1997.

3. D. Pendergast, The Greenhouse Effect, AECL, January 1992.

4. Technology Innovation for Mitigating Greenhouse Gas Emissions, Technology Table Foundation Paper, Climate Change Secretariat, Ottawa, 1998 October 30.

5. Canada's Energy Outlook: 1996 - 2020, Natural Resources Canada, April 1997.

6. Canadian Energy Supply and Demand to 2025, National Energy Board, 1999.

7. Nuclear Energy Insight 98, Nuclear Energy Institute, December, 1998.

8. Plan for Producing Potable Water Economically, International Atomic Energy Agency, General Conference, Item 16, August 1999.

9. R.B. Duffey, W.T. Hancox, D.R. Pendergast and A.I. Miller, Hydrogen and Nuclear Energy: Building Non-Carbon Bridges to the Future, revised version of AECL Paper presented at 9th Canadian Hydrogen Conference, Vancouver, February 1999.

10. A.I. Miller, The Case for Rail Conversion to Hydrogen-Powered Fuel Cells in the Context of CO_2 Emission Abatement, CAN Conference on Energy and the Environment, November 1999.

11. Nuclear Energy - The Future Climate, The Royal Society and the Royal Academy of Engineering, June 1999.

12. An Appropriate Role for Nuclear Power in Meeting Global Energy Needs, Policy Paper, The Atlantic Council of the United States, February 1999.

CHAPTER 4: CANDU R&D

The Panel reviewed a number of areas of CANDU R&D this year. This is the first year that the Panel has reviewed the topics of Generic Action Items (GAIs) and Computer Code Management. The Panel also prepared updates of subjects covered in previous years, namely, Fuel Channels, Advanced Fuel Cycles, Heavy Water Production Technology and the CANDU-X concept. The following is a summary of the 1999 review. A detailed analysis of the review has been submitted separately to AECL.

4.1 GENERIC ACTION ITEMS

In 1962, the AECB established a requirement for analysis of the consequences of certain postulated failures in CANDU reactor systems (i.e., single process system failures) and of these same postulated process system failures coincident with the unavailability of special safety systems (known as dual failures). This requirement, and subsequent expansions of it, have served as an overriding determinant of the direction, scope, priorities and depth of AECL safety technology programs. It should be noted that this regulatory requirement was imposed upon AECB licensees (i.e., the three utilities in Canada that operate CANDU stations).

As the licensing of the Pickering, Bruce, Gentilly and Point Lepreau stations progressed through the 1970s, the AECB endeavoured to document its requirements in a Consultative Document entitled "Proposed Regulatory Guide - Requirements for the Safety Analysis of CANDU Nuclear Plants, C - 6, June 1980". Discussion among the AECB, the utilities and AECL on the conversion of the Consultative Document into a Regulatory Guide for application to new CANDU designs began in 1980 and continues today.

One outcome of the evolutionary development of regulatory requirements for the safety analysis of CANDU power reactors was the decision by AECB in 1988 to begin identifying and publicly reporting the significant issues that had arisen in the licensing of CANDU stations and were considered to be generic. These Generic Actions Items (GAI) were communicated to the utilities and to AECL with requests for plans and schedules for resolving them. The analysis of these unresolved safety issues is often complex and time-consuming and, in most instances, R&D programs are necessary to support and to validate the analytical methods employed and their results. In its Annual Report for 1995, the Panel discussed the status of GAIs being addressed in AECL's safety R&D programs at that time. Early resolution of the items has recently been declared by AECB to be of fundamental importance in licensing the continuing operation of CANDU stations. Equally, the importance to new CANDU 6 and CANDU 9 designs is self-evident. As a consequence, the Panel decided that its Annual Report for 1999 should include a more comprehensive discussion of GAIs and their status than previously reported.

In January 1999, the AECB began issuing a series of Position Statements on GAIs. These Statements identify the particular safety issues involved and the actions considered by AECB staff to be required for their satisfactory resolution. Eleven AECB Position Statements have now been issued and it is the staff's intention to issue similar statements on all outstanding GAIs, a total of fourteen as of 24 September 1999.

The Panel is confident that the actions currently underway and those to be initiated shortly by AECL and the utilities will successfully bring closure to all outstanding GAIs.

4.2 THE LICENSABILITY OF CANDU 9

In September 1994, AECL requested that the AECB undertake a regulatory review of the preliminary design of the CANDU 9 nuclear power plant, recognizing that prospective foreign customers of all reactor vendors require a statement of licensability in the country of origin for any new nuclear plant design as their first prerequisite. The purpose of the regulatory review was to identify any features of CANDU 9 and AECL's proposed licensing approach that would constitute a fundamental barrier to the licensing of a CANDU 9 in Canada. On 15 January 1997, the AECB staff issued a "Statement on CANDU 9 Licensability", in which it concluded that there were no fundamental barriers to the licensing of the CANDU 9 design in Canada.

4.2.1 Additional Work Items

The AECB staff statement was based on documentation submitted by AECL on the preliminary design of CANDU 9 in what was agreed as the equivalent of the "pre-project" phase of an actual project. The statement was issued in anticipation that AECL would successfully complete the detailed design and assessment activities required for the preparation of the customary "Preliminary Safety Analysis Report" demanded by international customers of any power reactor vendor.

The AECB staff statement on CANDU 9 licensability lists Additional Work Items to be resolved. The AECB intends to issue an update of its licensability statement on CANDU 9 in mid 2000 to record its findings regarding AECL's actions on the Additional Work Items.

4.2.2 Conclusions

A regulatory review of the CANDU 9 preliminary design was requested by AECL in September 1994, to determine whether or not any significant barriers to licensing the design in Canada might exist. A co-operative approach to the accomplishment of their respective objectives and fulfilment of their respective responsibilities was developed by AECB and AECL staff members. The Panel commends the AECB and AECL staff members who developed this process.

It is essential that the momentum of the process developed by AECB and AECL staff be maintained. This will require continuing effort by both organizations.

Prompt resolution of a relevant GAI and successful completion by AECL (and subsequent formal closure by AECB) of the Additional Work Items described in the 15 January 1997 AECB staff statement on the licensability of CANDU 9 will ensure international acceptance of the design. Allocation of adequate resources and, in particular, appropriate human resources, by AECL is required to achieve this objective.

4.3 MANAGEMENT OF COMPUTER CODES FOR DESIGN AND SAFETY ANALYSIS

In the past year, the Panel had presentations from senior AECL personnel on the development, application and management of its computer codes. The Panel has not previously reported on this topic and intends to revisit it in the next annual Report. Also, the Panel deals here only with codes associated with nuclear reactor design and safety analysis. For the present purpose, a computer code may be defined as "a mathematical expression of the physical world which allows simulation of system design and performance".

Computer codes for design and safety analysis support key elements of AECL's business activities. AECL's continuing objective is to develop and maintain a qualified set of codes to support its business activities, including past and current projects as well as new designs and procedures.

4.3.1 AECL Computer Codes and Their Development

Although more than 600 computer codes have been used in CANDU and MAPLE reactor design and licensing processes, much fewer are key to its design and licensing processes in the areas of reactor physics, thermalhydraulics, fuel and fuel channels, fission-product behaviour and containment.

Key computer codes have evolved over many years. More sophisticated versions of the codes with better quality assurance and more comprehensive validation are certified for use as "frozen" versions from time to time. Continuing code development, led by technical experts in various fields, is needed to incorporate advances in understanding of the technology, and to permit product evolution. Computer code development often drives R&D programs. The basic approach taken by AECL, which has worked well over the years, is to perform experiments to provide insights and experimental data needed for its major computer programs. At present, about one-third of the work being done in AECL and COG safety-related R&D programs is on computer code development.

4.3.2 Software Quality Assurance

Since computer codes have vital roles in both design and safety analysis, designers and regulators must have high confidence in their accuracy and reliability. A key element in achieving this confidence is the application of quality assurance principles and procedures to computer codes. AECL has developed a specific policy for software quality assurance and issued the AECL Quality Assurance Manual for Analytical, Scientific and Design Computer Programs early in 1998.

4.3.3 Computer Code Validation

A major challenge in the validation of codes for safety analysis arises for accident scenarios that lead to severe consequences, such as large-scale core disassembly or fuel melting. Experimental programs to investigate such scenarios are very difficult and costly. Joint international programs are an appropriate means to ease the difficulties and costs in such cases. For example, AECL is participating in the international RASPLAV program, which is undertaking experiments on the melting of actual reactor core materials [1].

4.3.4 Uncertainty Analysis for Codes

It is important in the development of computer codes to establish the uncertainties in the predictions of key parameters. This is particularly important for safety analysis for licensing purposes, for which the AECB requires an uncertainty assessment and allowance. Together with others in the nuclear industry, AECL is now developing an approach to safety analysis that uses a best estimate, rather than a conservative approach, coupled with a more rigorous, statistically based uncertainty analysis that provides much more reliable knowledge of safety margins.

The present methodology represents an important step forward in the validation of computer programs and provides a more informative safety analysis, yielding reliable data on the true safety margins for key parameters in accident scenarios. Such information allows reduced conservatism in reactor design, with the potential to reduce capital costs and improve operating flexibility without jeopardizing safety. In addition, by identifying the uncertainties with the greatest impact, this methodology can focus R&D on the areas that really matter. The AECB has recently expressed support for the use of this methodology, while identifying certain issues that need further attention.

4.3.5 Industry Standard Toolset

Code development is very time consuming and costly. It has been recognized that the Canadian nuclear industry cannot afford to write, qualify and validate different computer codes to perform the same task. Agreement has been reached among AECL, OPG, New Brunswick Power and Hydro Quebec to use and maintain a single set of key computer codes, with one exception, for licensing and safety analysis. The one exception is for the basic thermalhydraulic codes; AECL, New Brunswick Power and Hydro Quebec will continue to use the CATHENA code while OPG will continue to use the TUF code.

AECL will have the responsibility for maintaining, ensuring software quality assurance, and validating six of the key industry standard toolset codes while, OPG will have the same responsibility for four industry standard toolset codes.

4.3.6 AECL Code Management Panel and Code Centre

AECL has established a Code Management Panel whose mandate is to provide advice and guidance on the development and application of AECL codes, to provide formal endorsement of quality-assured, validated codes ("frozen" codes), and to provide oversight and leadership.

Another responsibility of the Code Management Panel is to oversee the management of the AECL Code Centre. AECL intends that the Code Centre will make AECL technology more readily available to universities, institutes and clients under controlled terms and conditions. By this means, it seeks to open more business opportunities, to attract students to the nuclear field, and to make nuclear technology more familiar and more acceptable to those outside the industry. The Code Centre will keep track of AECL computer codes, facilitate and oversee the transfer of these codes to external organizations, facilitate operation of user groups for key codes, and serve as a point of contact for external bodies on AECL codes.

4.3.7 Conclusions

The development and maintenance of computer codes, which play a major role in the design and safety analysis of CANDU and MAPLE reactors, rely significantly on the knowledge, experience and judgement of experts in the various technical disciplines. In its 1998 Report, the Panel discussed a pilot project on succession planning for key personnel. Recognizing the importance of codes to AECL and the intense competition in the market place for people with computer skills, this approach should be used to analyze AECL's core expertise in computer codes.

The Panel endorses the effort that AECL is devoting to software quality assurance. The Panel is impressed with the approach being taken by AECL on uncertainty assessment for key output parameters of computer codes. It believes that this approach has the potential for reducing unnecessary reactor design conservatisms, improving reactor operating flexibility, and focusing R&D on the most significant areas.

The Panel also supports the establishment of the AECL Code Centre. It believes that promoting familiarity with CANDU and MAPLE technology will not only promote business opportunities, but will also help to attract young engineers and scientists to the nuclear industry.

4.3.8 Recommendations

Recommendation 1

The Panel recommends that AECL apply the methods developed in its pilot program on succession planning for the purpose of safeguarding and maintaining its core expertise.

Recommendation 2

Recognizing the difficulties involved in certain experiments needed for computer code validation, the Panel recommends that AECL continue to participate in appropriate generic international R&D programs.

Recommendation 3

To help achieve the objectives of the AECL Code Centre, the Panel recommends that AECL develop a program and mechanisms to inform potential users of the existence of the Centre, the services that will be provided and other relevant information.

4.3.9 References

1. Behaviour Of Corium Melt Under External Cooling, Final Report of First Phase of RASPLAV Project, Kurchatov Institute, Moscow, January 1998.

4.4 FUEL CHANNELS

The Zr-2.5% Nb alloy pressure tube, now used in all CANDU reactors, is the key component that determines the service life of a fuel channel. Irradiation and pick-up of deuterium, which is generated by corrosion and the dissociation of the heavy water coolant, can significantly change the strength and fracture toughness of this alloy at some locations along a pressure tube. Also, during normal operation of the reactor, there are changes in length, diameter and curvature (sag) of the pressure tube.

Research and development on the inspection of fuel channels by AECL spans three decades. During that period, AECL has provided equipment and conducted or supervised inspections of many pre-service and in-service channels. All pressure tubes are manufactured and inspected to AECL specifications prior to installation. Garter spring location is a key installation issue; AECL developed the eddy current method that is used by tube installers to confirm garter spring location. Since 1986, Ontario Hydro (now OPG) has provided most of the routine in-service volumetric inspection done on CANDU fuel channels, with R&D input from AECL.

Recent organizational changes at OPG have included cutting the inspection services that they offer to other utilities with CANDU power plants. To fill this gap, and to take advantage of R&D advances made by AECL and others in inspection techniques, AECL has designed and built a "wet" fuel channel inspection system that does not require feeder isolation or freeze plugs. The new system which is twice as fast as the old "dry" system, was used in the fall of 1999 to inspect a sample of fuel channel in Romania's CANDU 6 reactor, Cernavoda-1.

Periodic inspection by non-destructive or destructive techniques, of selected pressure tubes, from operating reactors must be supported by an underlying research program on deformation, deuterium ingress, and fracture properties. Significant progress has been made in inspection techniques and in understanding the statistics of the material data and developing probabilistic approaches. The Panel is optimistic that this will lead to improvements in design equations, and that this program may eventually point the way to changes in material and manufacturing specifications that will reduce variability in deformation behaviour and/or deuterium pick-up.

4.4.1 Recommendations

Recommendation 1

Because of the growing importance of plant life extension and retubing methods and practices, the Panel recommends that AECL continue to have a research program in this area to support the enhanced inspection services that it will now offer CANDU owners in Canada and other countries.

Recommendation 2

Given the progress made in understanding and applying probabilistic approaches to the description of material and pressure tube behaviour, the Panel recommends that AECL continue its efforts to develop and improve the equations currently available to describe diametral expansion, longitudinal elongation and deuterium ingress.

4.5 ADVANCED NUCLEAR FUEL CYCLES

AECL has devoted considerable resources in the past to the development of advanced nuclear fuel cycles. Indeed, the Panel has noted in its past reports (1993 to 1996) that the demonstration of fuel cycle flexibility with CANDU will constitute a significant marketing advantage, even in countries already operating light water reactors.

Over the past year, various milestones have been reached, including:

- irradiation of 24 CANDU Flexible Fueling (CANFLEX) bundles in a CANDU 6 reactor for demonstration of behaviour under normal operating conditions in a power reactor; and
- fabrication of the first Direct Use of PWR Fuel in CANDU (DUPIC) fuel pellets from real spent fuel at CRL using the OREOX (Oxidation, Reduction of Enriched Oxide Fuel) process, for experimental irradiation in the NRU reactor.

4.5.1 The CANFLEX Fuel Development Program

The CANFLEX fuel development program has been one of AECL's major sustained efforts leading to the use of advanced fuel cycles. This program has now entered the critical stage of demonstration irradiation in an operating power reactor, leading to certification for full-core implementation in CANDU reactors. The 24-bundle demonstration irradiation started in September 1998 in Point Lepreau and will extend to April 2000, when the final irradiated CANFLEX natural uranium bundles will be subjected to post-irradiation examination at CRL.

Relative to the current 37-element fuel bundle design used in most operating CANDU reactors, the new CANFLEX bundle design offers a significantly higher critical channel power, lower peak element power ratings and the ability to maintain integrity to extended burnups at high power.

In addition to opening up the way to advanced fuel cycles, the CANFLEX fuel bundles with natural uranium can be introduced economically in operating CANDU reactors, because they provide enhanced reactor operating margins. These margins could avoid or postpone derating due to aging. Although the fabrication costs of CANFLEX (with natural uranium) may initially be 10 to 15% higher than the standard 37-element fuel bundles, the additional revenues arising from the increase in reactor power make a strong business case.

Another short-term benefit arising from the CANFLEX program is the opportunity of marketing a low-void-reactivity fuel. Such fuel could conveniently be introduced when the existing reactors are shut down for retubing. For new reactors, it could be offered as an option.

4.5.2 The DUPIC Option

For the DUPIC fuel cycle to become a reality, the feasibility of recycling spent PWR fuel directly in a CANDU reactor must also be demonstrated from a reactor physics point of view. In particular:

- achievable burn-up in CANDU with spent PWR fuel must be sufficient to justify the cost of remote fabrication and disposal of the DUPIC fuel;

- performance parameters for DUPIC fuel must fall within the standard (natural uranium) CANDU operating envelope; and
- reactivity coefficients may differ, but the existing reactivity devices must be adequate for control and safety.

Development of the DUPIC cycle is being carried out in collaboration with the Korean Atomic Energy Research Institute (KAERI) and the US Department of State. Over the past five years, KAERI has done detailed reactor physics analyses of a CANDU 6 reactor with DUPIC fuel. The KAERI study is based on the heterogeneous inventory of fuel from different reactors at different times. One of the major difficulties with the direct use of this spent fuel is the heterogeneous composition of the assemblies, and the fact that as many as 23 CANDU bundles can be fabricated from each assembly.

It is clear that variations in spent PWR fuel composition could lead to a large uncertainty in DUPIC fuel bundle properties and result in a significant reduction in operating margin. The proposed solution to this heterogeneity problem is a blending strategy for the powder coming out of the OREOX process. In the Panel's view, the feasibility of DUPIC in a CANDU 6 has been demonstrated for Korea, but would require a significant degree (20%) of blending with fresh fuel to reduce the heterogeneity of the DUPIC fuel bundles.

The Panel considers that the heterogeneity problem with DUPIC could possibly be resolved without resorting to blending with fresh uranium, with a more judicious inter-assembly mixing of DUPIC powders.

4.5.3 Conclusions

The Panel concurs with AECL that R&D in advanced fuel cycles must continue to be supported. In the short term, the slightly enriched uranium (SEU) option offers the most potential for improving the performance of CANDU reactors. This option also includes the use of recovered uranium from commercial reprocessing of light water reactor fuels. Use of SEU fuel not only leads to significant savings in operating costs (as much as 30% of the fueling costs), but it will also provide an additional degree of freedom to design low-void-reactivity-fuel and to reduce the size of the core.

As a long-term option, the DUPIC fuel cycle appears to be most promising.

4.5.4 Recommendations

Recommendation 1

The Panel recommends that AECL investigate the proposed powder mixing strategy for DUPIC in greater detail, in view of the negative impact of using fresh fuel in the current approach.

4.6 HEAVY WATER PRODUCTION TECHNOLOGY

The use of heavy water as a moderator is undoubtedly the key characteristic of the CANDU reactor. The heavy water moderator underlies the excellent neutron economy of the CANDU, exceeding that of all other power reactor types. The excellent neutron economy leads to efficient utilization of mined uranium, and permits the use of advanced fuel cycles without major changes to the CANDU design.

The Panel reviewed in detail heavy water production technology, supply and demand, economics and R&D requirements in its 1996 report, and up-dated this review in its 1997 report. In these reports, the Panel recommended ongoing and increased support for R&D on new production technologies. Since then, the Panel has been updated on recent developments in this area and has visited the Prototype CIRCE Plant being constructed at Air Liquide in Hamilton. This section provides a progress report and assessment of current AECL activities in this field.

In order to meet the demand for projected sales of CANDU reactors, AECL has an existing inventory of heavy water. Some of this heavy water is on loan to the Sudbury Neutrino Observatory project. AECL is inventing new technologies to meet future demand based on the patented wet proof catalyst system. AECL also has an inventory of tritiated heavy water which it acquired during the development of its prototype reactor programs. Some R&D activity is directed toward the removal of tritium from this inventory.

4.6.1 New Technology Initiatives

In Section 6.2.1 of its 1997 Report, the Panel noted that AECL was working on the final details of an agreement with Air Liquide Canada to deploy a prototype 1 Mg per year by-product heavy water plant from Air Liquide hydrogen production in Hamilton. Construction of this plant, the Prototype CIRCE Plant was almost complete and commissioning was beginning when the Panel visited the site in September 1999.

The plant utilizes the Combined Industrial Reformed Hydrogen and Catalytic Exchange (CIRCE) process as the first stage. Hydrogen is produced in a modified steam-methane reformer owned by Air Liquide Canada in which a methane feed reacts with steam at high temperature to produce hydrogen and other gases. After removal of the other gases, hydrogen passes through a catalytic-exchange bed in which the deuterium content of counterflowing water is increased. The water then goes to a second stage which uses the Bithermal Hydrogen Water process to further enrich the water in deuterium. In the third and final stage, the Combined Electrolysis and Catalytic Exchange (CECE) process is used to produce the product heavy water.

As the start-up of the Prototype CIRCE Plant approaches, there is increasing urgency to develop a computer simulation of the plant as-built. The as-built simulation is needed to analyze the performance of the operating plant to demonstrate that it meets expectations, to provide a means of resolving operating problems, and to serve as the basis for the design of commercial CIRCE plants.

To remove tritium and up-grade the used heavy water, AECL is proposing the construction of the Heavy Water Production System at CRL, with a capacity of about 300 Mg per year. The technology to be used is a modification of the CECE process. The CECE process makes use of the water-hydrogen exchange process in which counterflowing streams of water and electrolytically

produced hydrogen are passed over the AECL-developed wet-proof catalyst to increase the concentration of the deuterium isotope in the water stream.

The CECE technology to be used in the Heavy Water Production System is also being considered for small units for de-tritiating heavy water at reactor sites. AECL is collaborating with Stuart Energy Systems (formerly part of the Electrolyzer Corporation) on the development of electrolyzers for these applications. Large centralized electrolyzers, as well as small local units, would also be needed for the hydrogen economy discussed in Section 3.4.2 of this report. Development of electrolysis cells for all these purposes is partly funded by the federal government, and testing of improved electrolysis cells is in progress at l'Université du Quebec à Trois Rivières.

Recent R&D on the wet-proof catalyst has yielded some important results:

- Evidence is growing that catalyst activity has a lifetime greater than originally anticipated. The longer the lifetime, the less frequently the catalyst will have to be reactivated or replaced, thus lowering operating costs.
- A method for spraying catalyst onto the supporting screen has been developed, which will reduce the costs of producing catalyst beds.
- Effective reactivation of catalyst beds has been achieved with a flowing mixture of oxygen in nitrogen.

4.6.2 Conclusions

AECL has now obtained experience in catalyst operation under industrial conditions and has brought the technologies to the brink of commercial demonstration.

The Panel agrees with the view, as expressed by senior AECL personnel, that there are still large benefits to be achieved from improvements in catalyst performance. Therefore, the Panel is convinced that continuing support for further R&D on wet-proof catalyst performance, reactivation and fabrication is essential.

4.6.3 Recommendations

Recommendation 1

Because of the importance of a computer simulation of the as-built Prototype CIRCE Plant to the analysis of its performance, the Panel recommends that the development of this simulation be given a high priority.

Recommendation 2

The Panel strongly recommends that AECL continue its collaboration with Canadian industry in the development of improved and larger electrolyzers.

Recommendation 3

Recognizing that there are still large benefits to be achieved from improvements in wet-proof catalyst performance, such as maximizing catalyst activity, minimizing fabrication cost, increasing lifetime, and scaling up for industrial process conditions, the Panel strongly recommends that support continue to be provided for research and development in this area.

4.7 THE CANDU-X CONCEPT

The Panel reviewed the objective and implementation of AECL's strategy for the evolution of the CANDU reactor design and the long-term Advanced CANDU Reactor Concept (CANDU-X) in its 1996 Report. The Panel revisited the CANDU-X concept in its 1997 Report following a change in the proposed coolant.

The long-term objective is to achieve reductions in both capital and operating unit energy costs below those of present CANDU designs while retaining the essential features of the design that underlie its successes and have made it attractive to customers, namely:

- heavy water moderator, separate from the coolant;
- horizontal fuel channels in pressure tubes; and
- on-power fueling with short fuel bundles.

The CANDU-X concept represents AECL's long-term vision of a revolutionary reactor design that, while retaining the essential CANDU features, incorporates "quantum" changes designed to meet the Company's ambitious unit energy cost targets. The purpose of the concept is to challenge AECL engineers and scientists to develop such a design, and to focus long-term R&D efforts to support this development. While the CANDU-X design may never be built as such, spin-offs from the supporting R&D should benefit the evolutionary development of the CANDU. This approach has already yielded potential benefits.

The current CANDU-X design concept is based on the use of supercritical water (SCW) coolant. There are a number of modern fossil-fueled power plants operating with SCW coolant, and recent studies in Japan and Russia indicate that SCW-cooled light water reactors are feasible with some extrapolation of current pressure vessel technology. The CANDU-X modular design, with pressure tubes rather than a pressure vessel, should provide an advantage in this respect.

4.7.1 Current CANDU-X Conceptual Design

The latest conceptual design for the CANDU-X, as described by Bushby et al. [1], is based on an arrangement that utilizes natural circulation of the primary coolant, rather than a pump-driven flow[6]. The advantages of this design are the absence of pumps in the primary circuit, reducing both capital and operating costs, and the enhancement of passive safety.

4.7.2 Analytical Studies of Natural-Circulation SCW Cooling of CANDU-X

AECL has developed an analytical model for predicting the thermalhydraulic behaviour of a natural-circulation SCW-cooled CANDU-X [1]. Preliminary results from analysis with this model show that, while channel powers similar to those in current CANDU reactors should be achievable with natural-convection SCW cooling, some modifications in fuel bundle design may be needed and some constraints on operating conditions may exist.

As discussed in the 1997 Panel Report, the high temperatures and pressure of the SCW coolant require a new composite fuel-channel design, the CANTHERM channel. In this design, there is no calandria tube and the pressure tube is maintained at a temperature close to that of the moderator by internal insulation.

Also in its 1997 Report, the Panel emphasized the necessity of developing successful designs for ensuring adequate sealing between the fuel channel and its end-fitting, and between the fuel channel and the fueling machine under the more onerous pressure and temperature conditions of the SCW-cooled CANDU-X design. AECL has developed a new "bore seal" design concept for fuel channel sealing, which should reduce the probability of leakage, simplify the fueling machine and increase fueling rates. A working model has been produced to demonstrate the principle of the bore seal.

4.7.3 Plant Engineering

Considerable R&D, as well as design effort, will be needed to ensure that the target for unit capital cost reduction is achieved, particularly considering the significant increase in pressure from current levels. Continuing efforts to improve plant constructability will be needed. In addition to development of the horizontal steam-generator design and of fueling machines suitable for the CANDU-X conditions, questions of plant control under supercritical pressure conditions, including start-up and shut-down procedures, must be addressed. Also, work will be needed to adapt or extend existing computer codes for the safety analysis of these designs, and to undertake studies on accident scenarios under supercritical water conditions.

---

[6] Natural circulation flow was used in some small boiling-water reactors in the USA in the 1950s by taking advantage of the large difference in densities between the water at the core inlet and the water-steam mixture at the core exit. Natural circulation flow is also used in AECL's low-power SLOWPOKE research reactors.

4.7.4 Conclusions

The Panel is very impressed by the progress made by AECL on the SCW-cooled CANDU-X and is pleased to note that a key function of the CANDU-X concept, to generate spin-offs that can be incorporated in to evolutionary CANDU designs, is already beginning to produce benefits. The bore-seal design, which could reduce costs and improve performance in conventional CANDU designs, is already the focus of an engineering project.

4.7.5 Recommendations

Recommendation 1

Considering the potential for spin-off benefits from the CANDU-X program, as well as its continuing challenge to researchers and engineers, the Panel recommends that AECL consider a significant increase in the budget for the CANDU-X concept.

4.7.6 References

1. S.J. Bushby, G.R. Dimmick, R.B. Duffey, N. Spinks and D.J. Wren, Conceptual Design for a Supercritical-Water-Cooled CANDU, June 1999.

CHAPTER 5: THE CANADIAN NEUTRON FACILITY

5.1 INTRODUCTION

Since its inception, the Panel has been a strong advocate of a new research reactor for AECL to replace the aging NRU Reactor. In 1998, the Panel devoted considerable efforts to help make the case for the Canadian Neutron Facility (CNF), based on a variation of AECL's MAPLE reactor technology, to meet the needs of:

- AECL, as a reactor vendor, for a research reactor for the support and future development of the CANDU reactor; and
- Canada, as an advanced industrial economy, for a neutron beam facility for basic and applied materials research.

The Panel presented a detailed review of issues relating to the CNF in its 1998 Report, and issued a special report in October 1998: "The Importance of the Canadian Neutron Facility to the Support and Future Development of CANDU Reactors". Members of the Panel also attended a National Workshop on Neutron Scattering in Ottawa in November 1998, which emphasized the importance of the CNF as a materials research tool.

These activities were a small part of those leading up to the completion of the CNF Proposal and Executive Summary. Now that these documents have been completed, submitted to the federal government and distributed to other interested parties, the Panel has very little to add to its already strongly expressed views on this matter. Therefore, only a brief progress report and assessment is provided here.

5.2 CURRENT STATUS

5.2.1 Recent Activities

As already noted, the major event of the year was the completion of the CNF Proposal and its Executive Summary by the NRC and AECL, which occurred in May 1999. The Panel is pleased to note that its above-mentioned October 1998 report on the importance of the CNF for support of CANDU technology was included as an appendix in the Proposal. The Panel contributed to the Proposal by providing AECL with a detailed editorial review. Members of the Panel have also written letters in support of the CNF to the federal Ministers of Natural Resources and of Industry.

As noted in the 1998 Report of the Panel, NRC and AECL have formed a high-level Steering Committee to provide direction and leadership to the campaign to secure financing for the CNF. The Steering Committee, composed of senior representatives of NRC, AECL, NSERC, and the independent Advisory Group has developed the CNF Communications Plan to raise the profile of the CNF to a broad audience in Canada.

Since the 1998 Panel Report was issued, actions based on the Communications Plan have emphasized the need for the CNF to federal and provincial ministers and departments, universities, industries and local politicians. The importance of the CNF as a materials research tool has been publicized in feature articles and editorials in newspapers. Presentations on the CNF have been made at scientific and industrial conferences.

These activities have elicited strong statements of support from universities, business leaders and local federal, provincial and municipal politicians.

5.2.2 Federal Government Policy Issues

The federal government perspective towards science and technology has become much more positive recently. Based on statements by the Prime Minister and senior cabinet members, as well as certain concrete actions, the government recognizes that the future of the Canadian economy and social structure depends greatly on Canada's success in adapting to a global economy that is becoming more and more knowledge-based, rather than resource-based. Evidence of this recognition includes an allocation of over $1.8 billion in the February 1999 budget, in the area of science and technology, and the announcement of funding for the Canadian Light Source at the University of Saskatchewan, the largest single R&D infrastructure investment in the last 30 years.

In addition, the important role of nuclear power in avoiding GHG emissions and assisting Canada into meeting its Kyoto Protocol commitments, as discussed in detail in Chapter 3 of this Report, is becoming recognized more fully by federal government departments involved in such questions. This should lead to a growing recognition of the need to ensure that AECL continues the commercial success of the CANDU reactor, which will not be possible without the replacement of the NRU Reactor by the CNF.

A recent book by Lester Thurow, a well-known professor of management and economics at the Massachusetts Institute of Technology, sets out new rules for success in the knowledge-based world [1]. Rule seven is: "A successful knowledge-based economy requires large public investments in education, infrastructure and research and development". Federal government financing of the CNF would be an important investment in R&D infrastructure to help ensure the ongoing success of the Canadian economy.

Therefore, the climate appears to be favourable for funding of the CNF. However, the Panel recognizes that there are many competing demands on the federal government for funding, and that considerable efforts will be needed to develop an understanding of the benefits to Canada of the CNF, and to ensure the federal government's commitment as soon as possible.

5.2.3 Design and Operational Issues

Experience gained in the design and construction of the MAPLE reactors, Hanaro in Korea and the MDS-NordionMedical Isotope Reactors (MMIR) at CRL, and in the preparation of the proposal for a MAPLE research reactor for the Australian Nuclear Science and Technology Organization (ANSTO), have led to beneficial modifications to the CNF design.

Experience with the MMIRs has suggested that construction costs may be reduced by moving the CNF from a site within the active area at CRL to a new site, adjacent to the present site but outside the active area. Before the reactor would go critical, the active area would be extended to enclose the CNF. The new location may also have the benefit of facilitating access for researchers using the neutron beam facilities. The costs and benefits of such a step are now being evaluated.

From experience with the ANSTO proposal, AECL has developed improved specifications for the cold source in the CNF, has optimized the plant layout and has identified more competitive sources for certain components.

The Panel has assessed the operating costs for the neutron beam facilities, as given in the proposal, and has found them to be reasonable, particularly considering the inclusion of a cold neutron source. Experience at a Japanese research reactor showed a ten-fold increase in users and associated costs after a cold source was installed.

5.2.4 Governance Issues

The Proposal does not go into detail on the governance of the CNF other than suggesting a possible management structure consisting of a Management Authority with separate directorates for the reactor, the CANDU facilities and the Neutron Beam Laboratory.

A key challenge to AECL and NRC is to work out a viable method of governance that satisfies the federal government's strategic concerns, AECL's needs for CANDU R&D, and the needs of individual researchers using neutron beam facilities. Also, the AECB must be satisfied that the design and operation of the CNF is managed appropriately to ensure that licensing requirements are met and that safety is assured.

Two of the issues that must be addressed in the governance model are:

- a means to manage the complex experimental scheduling requirements, and
- arrangements for funding neutron-beam research.

NRCan has been requested to develop a governance model for the CNF that will meet these needs. One possibility being considered is setting up a separate legal entity from AECL and NRC to receive and administer the funding. An acceptable governance model may be key to gaining federal government approval of the CNF proposal.

5.2.5 The Neutron Gap

In its previous reports, the Panel has expressed concerns about a "neutron gap", a period between the shutdown of the NRU Reactor and the start up of the CNF in which Canada, and the CANDU program in particular, would not have access to an indigenous research reactor.

5.3 CONCLUSIONS

As stated by Nobel Laureate Bertram Brockhouse in the Executive Summary of the CNF Proposal "The Canadian Neutron Facility offers unprecedented potential for the advancement of materials research in Canada and is indispensable for the continued success of Canada's nuclear program". The Panel strongly endorses this statement, which is essentially the same message expressed many times in the past by the Panel.

In addition, the Panel emphasizes the urgency of a firm commitment by the federal government to the CNF. The Panel believes it is important to make this strategic investment in a timely manner in order to maintain scientific talent and continue with leading edge research.

5.4 RECOMMENDATIONS

Recommendation 1

The Panel recommends that AECL continue to press for the earliest possible commitment of the CNF by the federal government to minimize the neutron gap.

Recommendation 2

Since a governance model acceptable to all stakeholders will be required, the Panel recommends that AECL give high priority to working closely with NRCan, NRC and other bodies to develop, as soon as possible, a governance plan that meets the key needs of those involved.

5.5 REFERENCES

1. L.C. Thurow, Building Wealth: New Rules for Individuals, Companies and Nations in a Knowledge-Based Economy, Harper Business, 1999.

CHAPTER 6: THE RADIATION BIOLOGY AND HEALTH PHYSICS PROGRAM

6.1 INTRODUCTION

In its previous reports, the Panel emphasized the importance of research concerning the effects of ionizing radiation on biological systems and the environment. The insights gained from such investigations support the industry, both directly and indirectly. Biologically-derived constraints are directly used by AECL, the nuclear utilities, and by the AECB to define the limits of acceptable engineering and design of safe operating conditions for the protection of workers, the public, and the environment from adverse effects of ionizing radiation. The costs associated with the design and operation of power plants within these limits impact on the economic viability of the long-term nuclear option. While nuclear energy continues to be an economically competitive option, under the current conservative regulatory framework, design and regulation in excess of biological necessity increase costs, which must ultimately be borne by the consumer. Thus, AECL, as the CANDU vendor, needs a continuing source of radiobiological information, and the in-house ability to critically analyze these data. The AECB and other government agencies need evidence and radiobiological advice in order to set workable regulatory standards.

6.2 PUBLIC CONCERNS

Public concerns about the safety of nuclear power plants can only be addressed responsibly through recourse to an evidence-based understanding of radiation effects. While science alone will not be sufficient to counter all the negative public opinions of nuclear energy, it is essential that proponents of the technology base their contributions on accurate information about biological and environmental effects, inter alia, of the nuclear plant life cycle. This need is not so much driven by AECL's internal requirements, as it is by the needs of public policy and long-term planning.

As an aside, it is noted that radiation biology has many fertile interconnections with other fields of health science as varied as oncology, toxicology, molecular biology and aerospace medicine. Thus, the continuation of a strong Canadian radiation biology program will be beneficial to areas of development that extend well beyond the immediate needs of a nuclear power program. Since the benefits of radiobiological research are far-reaching, it is reasonable to expect that all the beneficiaries should collectively contribute to its support, and that AECL alone should not be expected to continue to fund the entire program in Radiation Biology and Health Physics.

Public concerns and the needs of the nuclear industry centre around the same issue, namely, what are the effects of low radiation doses. The conservative assumption underlying the internationally accepted basis for the regulation of radiation safety is that all exposures are harmful in proportion to the dose received, an assumption that has been received as a fact by the public. This dose effect holds in the high dose range in which it is possible to perform statistically sound experiments. However, at the very low doses, which can realistically occur with some frequency to nuclear energy workers or to the public, the effect, if any, is less certain.

This is so because it has not been possible to perform statistically valid epidemiological analyses to detect the low frequency of birth defects or cancers caused by radiation against the high background of spontaneous events.

The evidence that the cellular basis of radiation effects is due to DNA damage came from radiobiological research, as did the observations that much of the damage, even at high doses, is quickly repaired. The magnitude of the damage from large doses swamps the repair mechanisms preventing complete repair. The residual damage leads to altered cell behavior and, in some cases, to the initiation of a cancer. It is not known whether this also happens with a proportional frequency at low doses since the extent of repair may be greater or even complete. New techniques in molecular biology allow consideration of experiments to determine whether cells, in fact, do reliably repair all the damage following low doses. Thus, the hypothesis that there is a threshold dose below which no significant effects occur has become testable. Should the hypothesis be proven to be true, then relaxation of current dose limits would permit major changes to be made throughout the industry, which would enhance the economic competitiveness of the nuclear energy option and could significantly improve public acceptance of nuclear power. The US DOE is proposing to fund a large research program to test the threshold hypothesis and Congressional approval of the funding is currently awaited.

6.3 FUNDING FOR RADIATION BIOLOGY

The dilemma faced by AECL regarding the Radiation Biology and Health Physics Branch was reviewed in the Panel's report in 1998. Briefly, reduced R&D funding by government together with the Corporation's mandate to become the CANDU reactor vendor, rather than remain the National Nuclear Laboratory, have constrained priority setting such that the minimum financial support required to maintain a vital stake in an independent biology program is no longer available. Although AECL continues to need dosimetry services and some radiation biology and health physics studies for its own purposes, the volume and scope of internal work in radiobiology are not adequate to sustain the interest of scientists and technologists, or to fully utilize the value of the CANDU Life Sciences Centre.

Radiation Biology and Health Physics is not a solitary outlier in AECL's R&D programs: it is an example of aspects of nuclear research that are required to support national policy development, nuclear industry regulation, public safety, and environmental protection. As such, it should logically be funded independently of AECL and held accountable through channels that are also independent of AECL. Thus, with the exception of the Dosimetry Services component, Radiation Biology and Health Physics is a program in transition. There needs to be a clear vision of what it is to become in the future. The program will need transitional support until the vision is accepted and implemented.

Through 1999, AECL's biologists and staff have led an initiative to sensitize the, hitherto, silent beneficiaries of the Radiation Biology and Health Physics Program to the need for change. There have been discussions with the AECB and the Radiation Protection Bureau of Health Canada. Perhaps fortuitously, the government announcement in the 1999 Budget of the restructuring of health research under the Canadian Institutes for Health Research presents an opportunity for a

resolution in which radiobiology could become integrated within one of the envisaged virtual institutes. Were this to occur, it would help to integrate this important aspect of AECL's R&D with the mainstream of biomedical research at the universities.

The situation now concerning Radiation Biology and Health Physics is somewhat comparable to that which formerly existed in the Material Science Program, and which has now been successfully transferred to the NRC after a three-year transitional period. The concern with Radiation Biology and Health Physics is that the mode and means of transition are not yet fully clarified, and that interim funding has not been identified.

6.4 NATIONAL CENTRE FOR RADIOLOGICAL SCIENCES

The AECL vision for the Radiation Biology and Health Physics Program is that it will be restructured as a "National Centre for Radiological Sciences", an independent institute attached to a university, or AECL, or another government department, and funded by its customers and beneficiaries. The National Centre for Radiological Sciences would be primarily based at CRL so as to take advantage of the facilities and to service AECL's requirements, but it would network nationally and internationally. Its scientific direction would be overseen by a board representing the shareholders, and its main function would be to:

- conduct R&D in radiation biology and health physics,
- provide dosimetry services to AECL and other customers,
- offer R&D and commercial services to clients,
- inform and advise government and industry, and
- participate in national and international standard-setting bodies.

It is projected that AECL will continue to support the Dosimetry Services component and the Radiation Biology and Health Physics R&D for CANDU-related needs.

The view from outside AECL is that Canada, for several reasons, very much needs to maintain a radiobiological capability.

6.5 CONCLUSIONS

There is a broad consensus that the radiobiological expertise that AECL has nurtured for so many years is a national resource and should continue with future financial support from its customers and beneficiaries.

The Panel commends AECL's scientific and technical staff for their creativity during this difficult period. The biologists have had success in several external funding competitions to support ongoing research. This demonstrates that the group has external credibility and that the

focus of its work is seen to have national and international significance. It is the Panel's view that the success of these initiatives should be seen as evidence of the importance and credibility of the program, and should not blind government and other potential beneficiaries of the program to the importance of ensuring the existence of a stable transitional funding platform for Radiation Biology and Health Physics over the next five years.

6.6 RECOMMENDATIONS

Recommendation 1

The Panel recommends that AECL continue to support the transition of the Radiation Biology and Health Physics Program toward a stable configuration. In the short-term, future customers and beneficiaries should be sensitized to the value of a National Centre for Radiological Sciences concept, and the necessity of sustaining the program through the transitional period. All reasonable possibilities for external funding should be pursued.

Recommendation 2

The Panel recommends that AECL closely follow developments related to the Canadian Institutes for Health Research and participate, where possible, in the development of the virtual institutes to ensure that no opportunity is lost to link the Radiation Biology and Health Physics Program into related national health research interests.

CHAPTER 7: UNIVERSITY RELATIONSHIPS

7.1 INTRODUCTION

Over the eight years during which the Panel has had an overview of AECL's R&D activities it has recognised the importance of links with universities. Probably the prime example of how successful such links can be is the strong interaction between the high-tech industries and the universities, in which industry promotion and support of teaching and academic research has given rise to extensive benefits for both sides.

Four major advantages are seen to accrue from AECL's university links:

- AECL has kept in touch with young people, who are the pool of developing talent needed for recruitment and who also play an important public relations role.
- Researchers at Chalk River keep abreast of developments elsewhere in the fundamental aspects of science and engineering; this helps AECL to maintain its position as a leading R&D organisation in Canada and abroad - a status that may be important to potential customers.
- University researchers in nuclear-related subjects are able to bring different but complementary perspectives to technical problems.
- University laboratories can be contracted to study problems which AECL cannot tackle itself because it lacks the resources.

These benefits - particularly the last two - have changed in significance in the last few years. This has been brought about by several factors, all of which have had the effect of placing more emphasis on "engineering" and "development" as opposed to "science" and "research". The single most important factor has been the approximate halving of the parliamentary grant to AECL. This necessitated the closure of the Tandem Accelerator Superconducting Collider (TASCC) facility and the decrease in importance of the "National Laboratory" aspect of AECL's activities. A second important factor has involved the restructuring of the CANDU Owners' Group (COG), which has reduced its R&D funding considerably to concentrate on improving CANDU plant performance. This has led to a reduction in the amount of COG R&D being carried out at AECL.

An indirect effect of all these reductions and changes has been that the numbers of undergraduate and graduate students, as well as post-doctoral fellows and professors, working at AECL have diminished over time. It therefore seems appropriate for the Panel to take stock of the situation in 1999, and to consider what can and should be done to improve AECL's relations with Canadian universities to take advantage of the potential benefits.

7.2 UNIVERSITY CHAIRS

AECL has a long-standing tradition of supporting senior research positions at Canadian universities, early examples being the appointments in materials science at the University of Western Ontario in the mid 1980s when AECL's materials science activities were curtailed and Chalk River staff moved there. More recently, the Bertram Brockhouse Chair was established at McMaster University in 1998 after AECL had made a one-time endowment in 1996.

Such appointments provide AECL with the links to the fundamental sciences mentioned earlier and enhance its reputation with the academic community. For example, at its 1999 December meeting, the Panel heard a presentation by the Brockhouse Chair incumbent, Professor Bruce Gaulin, who described his research activities in advanced materials. It is clear that these activities are at the forefront of research into condensed matter physics and provide an excellent example of the synergy between the NRC group operating the neutron beam facilities at Chalk River and the universities. The provision of the CNF will be vital for these and other activities in the future. Similarly, AECL is seen as giving considerable support to the fundamental science community by its loan of a large quantity of heavy water to the Sudbury Neutrino Observatory Project.

7.2.1 NSERC Industrial Research Chairs

One important aspect of supporting university chairs is that matching funds can often be obtained from industrial partners and, through NSERC, the federal government. In general, a financial contribution to an NSERC Industrial Research Chair by AECL is matched by one industrial partner or more, and their total is matched by NSERC. By providing seed money and other appropriate support, therefore, AECL is able to favour the development of certain topics of research and specializations; in this way, types of expertise that would otherwise be lacking can be fostered. The initial commitment to an Industrial Research Chair is made for five years, and during this period the chairholder's salary is gradually taken over by the university. This means that the university commits a tenure-track position to the chair. Once the incumbent is appointed to an Industrial Research Chair and the infrastructure and equipment put in place, graduate students, post-doctoral fellows, visiting professors, etc. arrive to participate in the research of the group.

An Industrial Research Chair may be renewed for another five years, but the NSERC rules for funding the second term are different since only the incumbent's salary, again on a sliding scale with the university, may be funded through this grant. The research activities are then supported by some other NSERC mechanism such as an Industrially Orientated Research grant, for which the incumbent must apply in competition with all other applicants for these grants.

AECL's experience with NSERC Industrial Research Chairs (IRC) is briefly summarized here:

IRC in Nuclear Engineering, University of New Brunswick

This was established in partnership with New Brunswick Power in 1984, renewed in 1989, and ended in 1991.

This was NSERC's first Industrial Research Chair. The appointee, Dr. D. Meneley from Ontario Hydro, established a low-level radiation laboratory for radiation tomography studies at the University of New Brunswick and developed techniques of analysis and modeling for nuclear reactors. Undergraduate and graduate courses in a nuclear option program were established to meet the recruiting needs of New Brunswick Power, and university faculty became involved in the operator training program at the Point Lepreau Station. Dr. Meneley resigned in 1991 to become AECL's Chief Engineer at Sheridan Park.

IRC in Nuclear Engineering, University of New Brunswick

This was established in partnership with New Brunswick Power in 1992, and renewed in 1997.

This succeeded the first Industrial Research Chair, but was established, under NSERC rules, as a completely new venture. The appointee, Dr. D. H. Lister from Chalk River, built a medium-level radiation laboratory where high-temperature loops and autoclaves have been installed for studying corrosion and mass transport problems in reactor coolant systems. Low-temperature systems have also been built to study the mass transport aspects of heat exchanger fouling. Undergraduate and graduate courses in the nuclear option have been developed, and contributions to the training of operators at Point Lepreau and the other Canadian nuclear stations are made.

IRC in Nuclear Engineering, University of Toronto

This was established in partnership with Ontario Hydro in 1989, renewed in 1994, and ended in 1999.

Dr. B. Cox from Chalk River brought expertise in the corrosion and hydriding of zirconium and its alloys to the University of Toronto where the Centre for Nuclear Engineering was established. Further elucidation of the mechanisms of zirconium alloy corrosion was accomplished in the research program using high-temperature autoclave facilities and surface analysis techniques. An important aspect of the program involved interaction with the University of Toronto SLOWPOKE reactor, where radiation damage phenomena could be studied. In fact, as Chair of the Centre for Nuclear Engineering, Dr. Cox led the application to NSERC for funding for a replacement core for the SLOWPOKE in 1996. Both the Centre for Nuclear Engineering and the SLOWPOKE reactor were key elements in an undergraduate option program in nuclear engineering and in training graduate students and post-doctoral researchers. By 1998, however, support for the reactor refurbishment had waned and by1999 the undergraduate option program had been discontinued. Dr. Cox retired and became Professor Emeritus in 1999 but remains as Chair of the Centre for Nuclear Engineering; he also has a position at Chalk River as Researcher Emeritus. While his research activities at the University are continuing, it is only until his remaining research students graduate.

IRC in Advanced Engineering Design, Univcrsity of Saskatchewan

This was proposed by AECL in 1995.

This Industrial Research Chair was conceived as a complement to AECL's existing and planned design activities in Saskatchewan, and was aimed at developing more efficient schemes for the

construction of major CANDU components with the added benefits of reducing costs and improving scheduling. The AECL activities in Saskatchewan have now been curtailed, however, and the Industrial Research Chair never materialised.

IRC in Applied Mechanics, École Polytechnique

This was under negotiation in 1999 with B&W Canada as AECL's industrial partner; and was approved by NSERC in 1999 December.

When this Industrial Research Chair is established, a scientist from Chalk River will be appointed as the Chairholder. The expertise that will be developed will be in the area of flow-induced vibration, which can be a life-limiting phenomenon in CANDU components such as heat exchangers and steam generators. The research should provide underlying scientific support for the more applied work being pursued at AECL. The appointment is expected to strengthen the nuclear component of the undergraduate engineering programs at École Polytechnique and to lead to further training of graduate students and post-doctoral researchers in an area of nuclear engineering. A strong link with the Nuclear Engineering program and the SLOWPOKE reactor operation at École Polytechnique is expected to develop.

7.2.2 Nuclear Engineering Chairs

Interactions with foreign universities, including the provision of Nuclear Engineering Chairs, has been and continues to be an important activity for AECL.

Currently, two chairs come into this category:

Chair in Nuclear Engineering, Institute for Advanced Engineering, Yongin, Korea

This was established in 1993 with the Institute for Advanced Engineering as partner. AECL's commitment is negotiated annually.

The objective of the incumbent, Dr. M. J. MacBeth, is to facilitate technology transfer between AECL and appropriate Korean organisations in aspects of CANDU, such as Computer Assisted Design and Drafting System (CADDS), controls, construction and safety analysis. Another objective is to forge strong collaborative links with important Korean industrial organizations.

Chair in Nuclear Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand

This was established in 1995 with partners Chulalongkorn University, Electricity Generating Authority of Thailand and the Canadian International Development Agency.

The chair is a key element of AECL's support for the Thai initiative in the extension and upgrading of university education in nuclear engineering, the planning and implementation of professional development programs for industry, and the education of the public with respect to nuclear energy. The incumbent, Dr. G. Bereznai, is also active in forging collaborative relationships with universities throughout Southeast Asia.

7.2.3 Summary

In summary, AECL's Canadian university chairs at present comprise one on-going Industrial Research Chair at the University of New Brunswick and one about to be launched at École Polytechnique. The collaborative links between AECL and universities are mutually beneficial and strengthen the science that is of interest to both parties.

7.3 RESEARCH CONTRACTS WITH UNIVERSITIES

AECL issues substantial research contracts to universities.

Of the 28 contracts issued in 1997 to 1998, 5 were performed abroad: 3 at Keele University (UK), and 1 each at the University of Minnesota (USA) and the University of Liverpool (UK). The Canadian contracts were distributed as follows: Carleton University (4), École Polytechnique (4), University of Manitoba (1), McMaster University (3), University of Montreal (1), University of New Brunswick (3), University of Ottawa (2), Sherbrooke University (1), University of Toronto (2), and University of Western Ontario (2).

Numerous graduate students have also prepared Masters' and PhD theses on nuclear-related subjects; many of these students took up employment subsequently in firms or agencies that deal with nuclear power.

Contracts are not only a cost-effective way of doing research and of providing important information to AECL, they also play key roles in improving the general understanding both of CANDU technology and of the importance of nuclear power in electricity generation and other applications. Accordingly, university contractors should be seen as partners, and not as competitors, in the achievement of specific scientific and engineering goals.

The Panel approves of university research contracts and finds that, given the many benefits to AECL that accrue from the issue of these contracts, the current policy of seeking the assistance of appropriate university experts be continued.

7.4 STUDENTS AT AECL LABORATORIES

AECL has a long tradition of hosting undergraduate and graduate students at both the Whiteshell and Chalk River Laboratories. In addition to the useful work they provided (and training they received), their involvement in AECL's programs has also served as an important public relations function, since it led to an increased understanding of the science and engineering aspects of nuclear power. Students have thus played a role in promoting public acceptance of nuclear power generation as a policy option.

In recent years, however, there has been a decline in the employment of students by AECL. For example, in the summer of 1991 (the year when the Panel began its deliberations) 79 summer students were employed at CRL, while in 1999 there were only 45 students and interns.

Because of the public relations importance of maintaining links with the university community, as well as the significant recruitment benefits that accrue by providing summer and other (e.g., co-op) jobs at AECL, the Panel recommends that these activities be maintained at least at their present levels.

7.5 THE CANADIAN SITUATION IN NUCLEAR ENGINEERING EDUCATION AND TRAINING

While no department offering first degrees in nuclear engineering has ever been set up in Canada, conventional engineering schools offering degrees in chemical, mechanical, etc., engineering have provided courses or option programs based on nuclear subjects. A few of these programs have emphasized the traditional nuclear engineering subjects such as reactor and neutron physics, reactor core design, thermalhydraulics and coolant technology, and have therefore offered quite intensive training in nuclear engineering. Others have merely added a smattering of nuclear-related subjects such as radiochemistry to give a flavour to conventional core subjects. At the graduate level, many graduate students have pursued research related to nuclear energy in various engineering departments in Canada.

Some universities and colleges have contracted their services to industry for training nuclear personnel and for preparing training material. It should be remembered here that the AECB imposes strict training requirements on personnel running nuclear facilities. To fulfill these requirements, the utilities Hydro-Québec and New Brunswick Power, with limited nuclear training facilities of their own, have used appropriate university services to fill in the gaps, which are often in the underlying science and engineering areas. Moreover, staff members employed by the AECB have used universities or colleges, which are independent of direct industry influence, to fulfill some of their own training needs.

It is interesting to note that at the five Canadian universities that provided data on their nuclear engineering programs to a survey-administered by the Canadian Nuclear Association [1], the numbers of undergraduates and the awarded bachelor degrees with nuclear content remained about the same from 1990 to 1998. By contrast, master's and doctoral students and the numbers of degrees awarded at those levels declined somewhat over the period, but probably not outside the expected statistical variation for such small numbers. The numbers of teaching staff also remained fairly constant.

In terms of research facilities at the universities, the recent shutdown of the SLOWPOKE reactor at the University of Toronto will have an impact on programs, in particular in Ontario. Elsewhere, however, there remain five university reactors. The SLOWPOKE reactor at École Polytechnique in Montreal has just received a new core, and the SLOWPOKE at Dalhousie University in Halifax is in the process of being refurbished. The SLOWPOKE reactors at the Royal Military College in Ontario and the University of Alberta also operate steadily as required, and the larger 5 MW pool-type reactor at McMaster University in Ontario is now operating successfully with a new management scheme. Although not all of these reactors are involved in nuclear-engineering programs per se (neutron activation analysis being the major role of the Dalhousie SLOWPOKE, for example), they all involve important aspects of nuclear technology in their operation, research and teaching functions.

It should be noted, too, that there are several facilities for nuclear engineering research at universities besides those ancillary to the SLOWPOKE reactors. In particular, the Nuclear Chair at the University of New Brunswick operates the intermediate-level radiation laboratory with high-temperature loops and autoclaves for reactor coolant studies, while a proposed new Chair at École Polytechnique will establish a laboratory with rigs for studying flow-induced vibration in reactor components. There are also engineering departments at universities across Canada with facilities capable of carrying out, or even devoted to, nuclear-related research. As a general example, thermalhydraulic rigs are available in many departments, while as a particular example, a containment simulation facility in the department of Mechanical and Aerospace Engineering at Carleton University, built to simulate SLOWPOKE accident conditions, has been adapted for general containment studies.

One issue of which the Panel is becoming increasingly aware in connection with nuclear engineering education and training is the advantage of writing a comprehensive text book on CANDU technology. While CANDU is mentioned in several texts as one example of a water-cooled nuclear reactor, no work offers a complete description of all the major CANDU aspects (by contrast, we refer to the recent publication by Dr. D. Rozon "Introduction to Nuclear Reactor Kinetics", Polytechnic-International Press, 1998, which concentrates on the core physics of CANDU). If such a comprehensive text were available to universities, institutes, clients and potential clients, the task of teaching the principles of CANDU and of transferring CANDU technology would be much easier. The provision of a CANDU text would also help an AECL Code Centre to achieve its objective of managing AECL's intellectual property, as invested in computer codes, and disseminating it appropriately.

7.6 THE CHANGING NATIONAL LABORATORY ROLE OF THE CHALK RIVER LABORATORIES

The change in AECL's mandate from a national nuclear laboratory to the nuclear vendor has caused a shift in the direction of research at AECL. The National Research Council now operates the Neutron Program for Materials Research (NPMR), formerly run by AECL. The NPMR includes five neutron-beam experimental facilities at the NRU Reactor, plus support services and equipment (as well as about 20 staff members). The existence of the NPMR within the Chalk River technical community provides an important, continuing link between AECL and the more fundamental science conducted by university researchers.

It is significant that the neutron beam facilities at the NPMR (especially the powder diffraction component of the DUALSPEC equipment and the surface analysis capability of the reflection technique) have brought a new breed of researcher to Chalk River - one that is far less versed in neutron diffraction techniques (they are not all physicists!) and less willing to spend lengthy periods at the facility. A new management scheme has been put in place to deal with the modified operating arrangements, which involve more users and much more data to be analyzed. The success of this venture should provide valuable lessons for the use of the proposed CNF by an even wider and much more numerous group of scientists.

The NPMR program currently involves about 100 scientists and engineers, who collectively carry out about 180 projects per year. Universities from across Canada (including ten from Ontario in 1997) have ongoing projects at NPMR. Many industrial customers in addition to the numerous AECL users have made use of the facilities. While the pattern of usage involving universities and industry is likely to continue, the numbers are likely to change.

7.7 RECOMMENDATIONS

Recommendation 1

The Panel recommends that AECL continue to support the establishment of University Chairs to complement specific aspects of CANDU development and to help its marketing activities; in this regard, AECL should move quickly to take advantage of the new federal government funding of 1,200 chairs promoting research excellence. The Panel further recommends that in order to do this effectively, AECL should institute a policy to consider the strategic placing of such chairs, to expedite their establishment and to monitor their progress when in place.

Recommendation 2

The Panel recommends that the employment of students be continued at the current level as a minimum.

Recommendation 3

The Panel recommends that AECL work with the universities and the Canadian Nuclear Society to support the writing and publication of one or more university-level text books to cover all the major features of CANDU technology.

7.8 REFERENCES

1. D.H. Lister, Country Report for Canada; The Survey and Analysis of Education in the Nuclear Field, OECD/NEA Report, 2000.

APPENDIX A: PANEL MEMBERSHIP

Dr. D.A. (David) Armstrong
Faculty Professor, Department of Chemistry
University of Calgary

Dr. R.L. (Robin) Armstrong
Department of Physics
University of Toronto

Dr. D.J. (David) Burns
Professor of Mechanical Engineering
University of Waterloo
(1999 Vice-Chairman)

Dr. A.A. (Albert) Driedger
Professor, Faculty of Medicine
University of Western Ontario
(1999 Chairman)

Mr. J.H.F. (Jon) Jennekens
Jonor & Associates

Dr. J.J. (John) Jonas
Birks Professor of Metallurgy and
Co-Director, McGill Metals Processing Centre
Department of Mining & Metallurgical Engineering
McGill University

Dr. D.H. (Derek) Lister
Chair, Nuclear Engineering
University of New Brunswick

Dr. E.A. (Ernest) McCulloch
Senior Scientist Emeritus
The Ontario Cancer Institute
Princess Margaret Hospital

Dr. G.G. (Gilles) Patry
Vice-Rector (Academic)
University of Ottawa

Dr. J.T. (Terry) Rogers, Professor Emeritus
Mechanical and Aerospace Engineering
Carleton University

Dr. D. (Daniel) Rozon, Directeur
Institut de génie nucléaire
École Polytechnique de Montreal

APPENDIX B: TERMS OF REFERENCE OF THE RESEARCH AND DEVELOPMENT ADVISORY PANEL TO THE BOARD OF DIRECTORS ATOMIC ENERGY OF CANADA LIMITED

B-1 MANDATE

The Research and Development Advisory Panel shall advise the Board of Directors of Atomic Energy of Canada Limited (AECL) respecting the strategic needs, alliances, and direction of the research and development activities of AECL. The Panel shall provide advice to the Board as to whether or not these programs have the appropriate scope, composition, and balance between short- and long-term activities, to sustain AECL's nuclear program, nationally and internationally.

B-2 DUTIES/RESPONSIBILITIES

To perform its Mandate, the R&D Advisory Panel shall undertake the following duties and specific responsibilities:

- The Panel shall meet not less frequently than three times during each AECL fiscal year to review all the R&D activities of AECL, and the operation of its major research facilities. The Panel shall report regularly to AECL's Board of Directors, including submission of an annual report, respecting the quality, appropriateness and relative size, and the need for any redirection of the scope, resources and priorities of the R&D programs.
- Panel representatives shall participate in the meetings of the Science and Technology Committee of the Board, and provide advice and confidential reports, as appropriate.
- The Panel shall meet regularly with AECL's product engineering and marketing staff to obtain their views on the R&D programs.
- The Panel shall meet periodically with representatives of Canadian utilities to discuss their needs and requirements so as to reflect these in the Panel's advice to the Board of Directors.
- In examining and advising on existing and proposed national and international scientific collaboration, the Panel shall also evaluate AECL's current and potential relationships with Canadian universities, and other post-secondary educational institutions, and organizations in the public and private sector conducting Canadian nuclear-related research.
- Members of the Panel may, after appropriate consultation with AECL, appear before properly constituted boards, commissions or committees of the federal or provincial governments in order to comment on all matters relevant to its Mandate.

APPENDIX C: PANEL PUBLICATIONS AND SUBMISSIONS

REPORTS

- Report of the AECL Research & Development Advisory Panel for 1998
- Report of the AECL Research & Development Advisory Panel for 1997
- Report of the AECL Research & Development Advisory Panel for 1996
- Report of the AECL Research & Development Advisory Panel for 1995
- Report of the AECL Research & Development Advisory Panel for 1994
- Report of the AECL Research & Development Advisory Panel for 1993
- Report of the AECL Research & Development Advisory Panel for 1992

SUBMISSIONS/PAPERS

- Science and Technology Review Submission, 1994 September
- Submission to the Environmental Review Panel for the Nuclear Fuel Waste Disposal Concept, 1995 August
- Submission to the Parliamentary Sub-Committee on Natural Resources on Bill to Review Nuclear Safety Act, 1996 October
- *The Importance of the Canadian Neutron Facility to the Support and Future Development of CANDU Reactors*, 1998 November
- Presentation to Natural Resources Canada on Consultation on Options for Federal Oversight of Nuclear Fuel Waste Management and Disposal, 1999 February 17
- Submission prepared at the request of Natural Resources Canada, *A Rationale for Canadian Expenditure on Nuclear Research and Development in the 21st Century*, 1999 May 14
- A report for Senior Levels of Government, *Vision 2020 and Beyond - The Need for Nuclear Research and Development in the 21st Century*, 1999 September

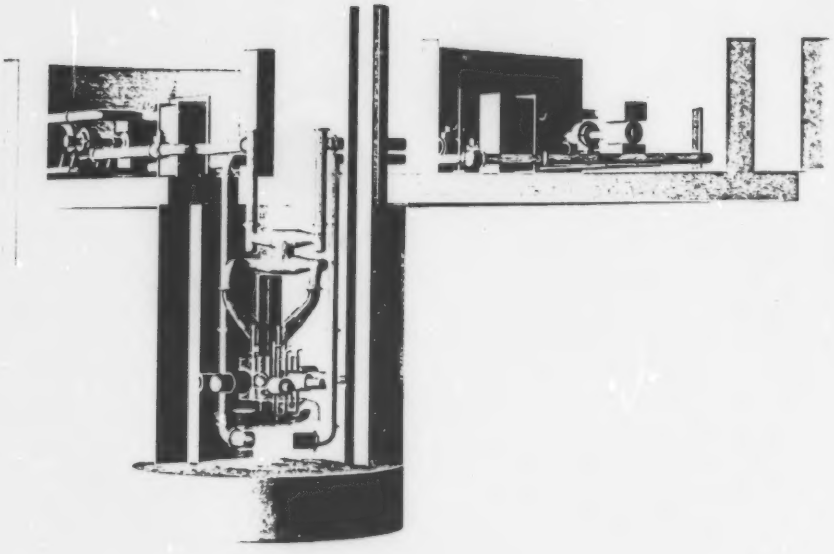
APPENDIX D: FREQUENTLY USED ABBREVIATIONS/ACRONYMS

Abbreviation/Acronym	Definition
AECB	Atomic Energy Control Board
AECL	Atomic Energy of Canada Limited
CANDU-X	Advanced CANDU Reactor Concept
CANDU®	CANadian Deuterium Uranium Reactor
CANFLEX® fuel bundle	CANDU Flexible Fueling
CATHENA	Canadian Algorithm for Thermalhydraulic Network Analysis
CANTHERM	A new composite fuel channel design for CANDU-X
CECE	Combined Electrolysis and Catalytic Exchange
CIRCE	Combined Industrial Reformed Hydrogen and Catalytic Exchange
CNF	Canadian Neutron Facility
COG	CANDU Owners Group
CRL	Chalk River Laboratories
DOE	US Department of Energy
DUPIC	Direct Use of PWR Fuel in CANDU
GAI	Generic Action Items
GHG	Greenhouse Gases
IAEA	International Atomic Energy Agency
IRC	Industrial Reseach Chair
LWR	Light Water Reactor
MAPLE	Multipurpose Applied Physics Lattice Experiment
MMIR	MDS-Nordion Medical Isotopes Reactor
NEB	National Energy Board
NPMR	Neutron Program for Materials Research
NRC	National Research Council
NRCan	Natural Resources Canada
NRU	National Research Universal Reactor

Abbreviation/Acronym	Definition
NSERC	Natural Sciences and Engineering Research Council
OPG	Ontario Power Generation (Before April 1999 – Ontario Hydro)
OREOX	Oxidation, Reduction Of Enriched Oxide Fuel
PWR	Pressurized Water Reactors
SCW	Supercritical Water
SEU	Slightly Enriched Uranium

Time-frame Definition as used in this Report	
Short-Term	0-5 years
Medium-Term	6-9 years
Long-Term	10-15 years

Rapport du Comité consultatif de recherche et développement d'EACL pour 1999



Circuits du réacteur du CCN

Rapport du Comité consultatif de recherche et développement d'EACL pour 1999

D.A. Armstrong

D.H. Lister

R.L. Armstrong

E.A. McCulloch

D.J. Burns

G.G. Patry

A.A. Driedger

J.T. Rogers

J.J. Jonas

D. Rozon

J.H.F. Jennekens

RAPPORT DU COMITÉ CONSULTATIF DE RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT D'EACL POUR 1999

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ i

Chapitre 1 : Introduction 1

Chapitre 2 : Bien-fondé de la recherche et développement nucléaire 3

Chapitre 3 : Les réacteurs CANDU et l'environnement 13

Chapitre 4 : R et D CANDU 26

Chapitre 5 : Centre canadien de neutrons 41

Chapitre 6 : Programme de radiobiologie et radioprotection 46

Chapitre 7 : Relations avec les universités 50

ANNEXES

Annexe A : Membres du Comité 59

Annexe B : Mandat 60

Annexe C : Publications et communications 61

Annexe D : Liste des abréviations et des acronymes 62

RÉSUMÉ

Avantages pour la société

La science et le génie nucléaires sont si profondément ancrés dans le mode de vie des sociétés développées que le citoyen moyen ne sait pas quelles conséquences pourraient avoir leur suppression. D'autres recherches sont encore nécessaires pour que la société puisse continuer à tirer profit des possibilités qui existent pour la production d'énergie, tout en évitant les émissions de gaz à effet de serre, et pour de nouvelles connaissances de la structure des matériaux.

Si le nucléaire ne fait pas partie des diverses sources d'énergie, tant dans les pays développés que dans les pays en développement, il ne sera pas possible d'obtenir la réduction prescrite des émissions de gaz à effet de serre à laquelle le Canada et d'autres pays se sont engagés dans le Protocole de Kyoto. Le Canada est un chef de file dans l'exploitation de la technologie nucléaire qui respecte le *Traité de nor-prolifération* et un bénéficiaire de la science nucléaire par le biais de la commercialisation internationale des réacteurs CANDU[MD] et MAPLE et des produits associés, qui contribuent également de façon considérable à l'expansion économique et à la création d'emplois. Il est de l'intérêt du Canada que le financement public de la recherche et développement nucléaire continue.

Sûreté

Une des priorités des fournisseurs, des organismes de réglementation, des opérateurs et des clients est de garantir la sûreté de la technologie nucléaire et, dans ce but, la Commission de contrôle de l'énergie atomique (CCEA) délivre des permis et inspecte toutes les installations nucléaires au Canada. De plus, pour répondre aux prescriptions des ventes internationales, la CCEA doit avoir déterminé que le produit est admissible à un permis au Canada.

Depuis 1988, la CCEA recense un certain nombre de modes hypothétiques de défaillance du réacteur considérés comme étant génériques aux centrales CANDU[†] et demande aux titulaires de permis de donner des informations sur les marges de sûreté dans ces conditions de défaillance. Les mesures nécessaires pour satisfaire ces sujets génériques ont souvent nécessité des travaux de recherche et développement pour lesquels les installations d'EACL ont été essentielles, même si la responsabilité des mesures incombait aux compagnies d'électricité. Plus récemment, la CCEA a entrepris de clore un certain nombre de sujets génériques qui étaient en suspens depuis quelque temps.

Codes de calcul

La majeure partie de la propriété intellectuelle d'EACL est formalisée dans des codes de calcul pour la conception et l'analyse de sûreté des systèmes CANDU. Les codes sont des modèles mathématiques qui décrivent des phénomènes physiques. Ils sont mis à l'essai en laboratoire et les

---

† CANDU[MD] est une marque de commerce déposée d'Énergie atomique du Canada limitée (EACL).

niveaux d'incertitude liés à leur utilisation sont établis avant qu'ils ne soient mis en oeuvre. Actuellement, environ un tiers de la R et D portant sur la sûreté entreprise à EACL et dans le cadre des programmes du Groupe des propriétaires de centrales CANDU est consacrée à l'élaboration des codes. EACL a élaboré et mis en œuvre une politique d'assurance qualité des logiciels afin de guider son processus d'élaboration des codes. En même temps, la Commission de contrôle de l'énergie atomique a émis un sujet générique qui définit ses prescriptions dans ce secteur ainsi que les critères pour leur clôture. Cet exercice permet de dégager des compétences professionnelles qu'EACL doit conserver si elle veut continuer à développer, à conserver et à utiliser cette ressource essentielle.

Réacteurs CANDU

Le canal de combustible Zr-2,5 % Nb est un élément du cœur du réacteur CANDU et sa vie utile est déterminée par une tendance à subir une déformation géométrique dans les conditions d'exploitation, ainsi qu'une modification de la ténacité à la rupture résultant de l'absorption de deutérium. Ces comportements ont été pris en compte dans les spécifications des matériaux, la conception des canaux de combustible et les protocoles d'inspection des canaux de combustible dans les réacteurs en exploitation pour lesquels EACL a conçu une nouvelle machine d'inspection.

La mise au point de la grappe de combustible CANFLEX a été une percée importante, et l'utilisation de cette grappe compensera à court terme la réduction de puissance qui sinon devient nécessaire quand les canaux de combustible vieillissants subissent une déformation géométrique. La grappe de combustible CANFLEX offre également la possibilité d'utiliser le combustible à uranium légèrement enrichi et le combustible à faible réactivité cavitaire pour les réacteurs actuels et futurs. Ces combustibles possibles présentent des avantages pour l'avenir à moyen terme. À plus long terme, l'option DUPIC (utilisation directe du combustible des réacteurs à eau sous pression (REP) dans les réacteurs CANDU) demeure possible. L'étape importante réalisée aux Laboratoires de Chalk River, au cours de l'année écoulée, quand les premières pastilles du combustible irradié des REP ont été produites par le processus DUPIC proposé, rend cette option plus plausible à long terme.

Une caractéristique très positive du réacteur CANDU est que ses performances sont concurrentielles par rapport à celles des REP actuels et qu'il présente beaucoup de possibilités à divers points de vue : améliorations du rendement, adaptation à des combustibles autres que l'uranium naturel, ajout de caractéristiques de sûreté passive et réductions des dépenses d'investissement et des coûts d'exploitation. EACL fait actuellement des recherches sur des modèles qui fonctionneraient à des températures et pressions supérieures atteignant celles de l'eau surcritique. La possibilité de recirculation naturelle, plutôt que l'écoulement pompé, est un exemple d'innovation qui contribuerait simultanément à atteindre tous les objectifs susmentionnés. Toutefois, des études détaillées sont nécessaires pour déterminer les effets du fonctionnement continu sur les matériaux et les composants dans de telles conditions. Le canal de combustible composite CANTHERM peut être la solution recherchée quant à une nouvelle forme de tube de force. Pour satisfaire l'exigence du chargement réacteur en marche, on a conçu un nouveau joint d'alésage. D'autres prescriptions relatives au concept de réacteur CANDU avancé (CANDU X) portent sur la gaine de combustible résistant à la corrosion pour les

températures supérieures envisagées. Bien que le réacteur CANDU X soit un concept plutôt qu'un produit tangible, les produits qui dérivent de ce travail peuvent être incorporés progressivement dans l'évolution du réacteur CANDU, en s'assurant ainsi que les modèles successifs ressemblent de plus en plus au concept CANDU X.

Eau lourde

L'eau lourde est le modérateur des réacteurs CANDU. Il est essentiel qu'EACL ait une réserve d'eau lourde suffisante pour ses ventes de réacteurs prévues. Un programme de recherche dynamique pour élaborer divers moyens de concentrer l'eau lourde a abouti à la construction et à la mise en service d'un prototype d'usine CIRCE *(Combined Industrial Reformed Hydrogen Catalytic Exchange*, soit procédé industriel combiné de reformage et d'échange catalytique) chez Air Liquide à Hamilton. Si le prototype s'avère un succès, un nombre d'usines en vraie grandeur reposant sur ce principe seront nécessaires.

Collaboration avec la communauté scientifique

La propriété intellectuelle d'EACL ne peut être préservée et élargie qu'en étant reconnue par la communauté scientifique nationale et internationale. Au cours des décennies de son existence, EACL a souvent appuyé les entreprises scientifiques en collaboration et en a tiré profit. Il n'a jamais été aussi important que l'on bénéficie au maximum des dépenses consenties pour l'infrastructure de recherche. La proposition de construire le Centre canadien de neutrons (CCN) dans le cadre d'un partenariat entre EACL et le Conseil national de recherches Canada en est un exemple. La construction de cette installation de façon opportune demeure la plus haute priorité si EACL doit continuer à jouer un rôle en tant que fournisseur de réacteurs novateurs avec la capacité à appuyer ses clients grâce à ses services de R et D après-vente. Le service Radiobiologie et Radioprotection jusqu'ici appuyé en tant qu'unité interne, doit également être repositionné afin que ses scientifiques soient reconnus par le public et soient intégrés comme il se doit dans la communauté des sciences biologiques du Canada. Finalement, le Comité a examiné les retombées pour EACL de ses relations avec les universités, par le biais du financement de chaires d'enseignement, de contrats de recherche et de bourses d'études et par l'aide aux programmes d'enseignement coopératifs. La science sous-jacente qui est finalement officialisée dans un type de produit n'est possible que grâce à l'activité d'esprits créatifs et hautement spécialisés qui ont à leur disposition les ressources nécessaires pour leur entreprise. Dans une ère de spécialisation accrue, le ferment essentiel peut être préservé grâce à des partenariats qui font tomber les barrières traditionnelles entre l'industrie et les milieux d'enseignement.

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

Le présent rapport est le huitième Rapport du Comité consultatif de recherche et développement présenté au Conseil d'administration d'EACL, comme le stipule le mandat du Comité. Dans le cadre de la préparation de ce rapport, le Comité au complet s'est réuni à quatre occasions pour au total dix jours afin d'étudier les articles du personnel scientifique ainsi que le personnel d'ingénierie du produit et du marketing, relativement à la mise au point du réacteur CANDU. Il y a eu également de nombreuses autres réunions de l'équipe de travail au cours de l'année pour développer les données présentées dans ce rapport.

Le Comité s'est également réuni avec des représentants d'Environnement Canada, d'Industrie Canada, du Secrétariat du changement climatique, de la Commission de contrôle de l'énergie atomique (CCEA) et d'*Ontario Power Generation Inc.* (autrefois Ontario Hydro) afin de mieux comprendre les questions relatives à l'élaboration des politiques de l'énergie et de l'environnement, au milieu de la réglementation et aux besoins des plus gros clients d'EACL au point de vue du soutien de R et D.

Le Comité a été invité par Ressources naturelles Canada (RNCan) à rédiger le rapport intitulé *A Rationale for Canadian Expenditure on Nuclear Research and Development in the 21st Century*, dont une version abrégée est donnée au chapitre 2. L'argument central de ce document a été adopté dans une version permettant une plus grande distribution sous le titre *Canada Vision 2020 et au-delà : Le besoin de la recherche et du développement nucléaire au Canada au XXIe siècle.*

Ce rapport est classé selon les thèmes interreliés suivants :

1. Les questions stratégiques (chapitres 2 et 3) dans lesquelles la recherche et développement nucléaire est examinée dans le contexte des questions historiques et actuelles d'EACL et en ce qui a trait à l'importance croissante que le Comité attache à éviter les émissions de gaz à effet de serre (GES) dans la production d'énergie.

2. Les questions de R et D CANDU sont examinées brièvement au chapitre 4. La sûreté, l'obtention des permis et les codes de calcul, la discussion du processus d'autorisation avec la CCEA et la clôture des sujets génériques (SG) y sont abordées. La section portant sur les codes de calcul suit directement les SG tout récemment publiés relativement aux normes et à l'assurance qualité. Le Comité reconnaît l'importance des codes, qui représentent une forme de gestion de la propriété intellectuelle, et a l'intention de faire le suivi de cet examen préliminaire dans les rapports futurs. La gestion et le prolongement de la vie utile de la centrale sont tirés de rapports antérieurs relativement au comportement des matériaux et des composants utilisés. Les percées de la technologie CANDU ont été importantes et le Comité a mis à jour des rapports antérieurs relatifs aux cycles du combustible avancés, aux nouveaux moyens de production de l'eau lourde et au concept CANDU X.

3. Les partenariats de recherche et développement sont traités aux chapitres 5, 6 et 7. EACL et la communauté de recherche canadienne interagissent dans de nombreux secteurs. Les défis respectifs auxquels font face le Centre canadien de neutrons (CCN) et le programme de Radiobiologie et Radioprotection aux Laboratoires de Chalk River (LCR) sont examinés. Dans les deux cas, on relèvera les défis à condition qu'EACL entretienne des relations étroites avec les communautés universitaires appropriées. Finalement, le Comité a examiné l'importance des relations d'EACL avec les universités comme le prescrivait le Comité des sciences et de la technologie du Conseil d'administration d'EACL.

Les points de vue du Comité sont résumés à la fin de chaque chapitre ou section (dans le cas du chapitre 4) dans 22 recommandations au total.

Le Comité s'est renforcé en 1999 avec la nomination de deux membres, M. Robin Armstrong et M. Gilles Patry, au mois de mai.

Le Comité tient à souligner l'excellente collaboration qu'il a obtenue des nombreux membres du personnel d'EACL qui ont présenté leur travail dans les délais impartis, ont fourni des données supplémentaires à la demande et ont toujours répondu à nos questions. Nous remercions tout particulièrement Barbara Gray et Marilyn Lloyd qui ont clarifié les politiques, facilité nos demandes, trouvé des sources d'information et fourni l'infrastructure nécessaire pour l'établissement d'un rapport. La rédaction de ce rapport n'aurait pas été possible sans leur collaboration sans réserve.

CHAPITRE 2 : BIEN-FONDÉ DE LA RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT NUCLÉAIRE

2.1 INTRODUCTION

Pour pouvoir conserver un haut niveau de vie, les Canadiens doivent disposer, entre autres, d'une énergie fiable, puissante et concurrentielle. Une source d'énergie assurée pour la nation est, et restera, une condition essentielle en vue de la création continue de richesses. Un objectif important de la politique de l'énergie nationale doit être de sauvegarder les sources d'énergie en mettant en œuvre une planification, un développement et une diversification prudents. Des événements comme l'embargo pétrolier de 1973 illustrent l'importance de s'assurer que le Canada continue à jouir d'une source d'énergie adéquate, différente, fiable et concurrentielle.

La politique de l'énergie doit prendre en compte les ressources disponibles pour la production d'énergie dans le pays. Le Canada a une abondance d'énergie hydraulique, de gaz naturel, de pétrole et de charbon et est le principal exportateur d'uranium au monde. Le résultat de cette abondance est que le Canada dispose d'un mélange varié de sources d'énergie électrique complètement différent de celui de la plupart des pays développés. En outre, le pays dépend davantage de l'énergie hydraulique et de l'énergie nucléaire que des combustibles fossiles. Ceci a permis au Canada de bénéficier d'une électricité économique et fiable avec bien moins d'émissions de GES et d'autres polluants atmosphériques que la plupart des autres pays industrialisés.

Les centrales nucléaires représentent 14 % de la puissance électrique actuelle du Canada, la majeure partie de cette électricité étant produite en Ontario. La technologie nucléaire a également profité au Canada dans de nombreux autres secteurs comme la médecine, l'industrie, l'agriculture, l'environnement et le foyer.

Pour s'assurer que les Canadiens puissent continuer à jouir des avantages d'une énergie électrique fiable, peu coûteuse et sans danger pour l'environnement, ainsi que des nombreux autres avantages de la technologie nucléaire, le Comité croit fermement que la science et le génie nucléaires doivent être développés et soutenus comme faisant partie intégrante du profil de haute technologie du Canada. En raison des avantages de la technologie nucléaire pour l'économie, la santé et l'environnement, nous recommandons que le Canada continue et augmente ses investissements en R et D dans la science et le génie nucléaires.

2.2 RÉALISATIONS DE LA SCIENCE ET DU GÉNIE NUCLÉAIRES CANADIENS

L'excellence de la science nucléaire canadienne au cours du dernier demi-siècle a été reconnue à l'échelle internationale pour de nombreuses raisons dont :

- la mise au point du réacteur CANDU, une des trois seules technologies de réacteur de puissance viables actuellement;

- la mise au point du réacteur de recherche et de production d'isotopes MAPLE;
- la mise au point de produits, comme les radio-isotopes médicaux qui améliorent la qualité de la vie humaine;
- la représentation à des organismes de science nucléaire internationaux;
- la participation à la lutte contre la prolifération des armes nucléaires; et
- l'obtention d'un prix Nobel.

Plusieurs dizaines de milliers de Canadiens doivent leur emploi direct ou indirect à l'investissement dans la recherche canadienne en science et en génie nucléaires. Environ 150 entreprises canadiennes et 3 000 sous-traitants, répartis dans tout le pays, bénéficient de chaque vente internationale de réacteurs CANDU. La répartition de ces entreprises est illustrée par la fabrication de joints d'étanchéité de pompes par Sulzer Canada, en Colombie-Britannique, l'exploitation minière de l'uranium par Cameco, en Saskatchewan, la construction de générateurs de vapeur par *Babcock & Wilcox*, en Ontario, la construction de cuves par *GEC-Alsthom Énergies*, au Québec et la fabrication de matériel de contrôle-commande des réacteurs nucléaires par *Adtech Manufacturing*, au Nouveau-Brunswick.

En plus d'offrir des occasions d'emplois, la science et le génie nucléaires contribuent à améliorer la qualité de vie des Canadiens à tout moment, grâce aux produits novateurs qu'ils créent. Par exemple :

- Dans le domaine de la production d'énergie, les réacteurs CANDU ont produit plusieurs milliers de térawattheures d'électricité économique et sûre au Canada et dans d'autres pays.
- Dans le domaine de la biologie, les isotopes ont rendu possible la révolution moléculaire. La conception de nouveaux traitements des plus efficaces, fondée sur une parfaite compréhension de la vie au niveau moléculaire, est un résultat direct de l'application des sciences nucléaires à la biologie.
- Dans le domaine du traitement du cancer, l'appareil de thérapie anticancéreuse au cobalt 60, mis au point au Canada est encore largement utilisé dans le monde entier et spécialement dans les pays en développement. Le Canada fournit environ 80 % des sources de cobalt utilisées dans ces appareils ainsi que les deux tiers des radio-isotopes produits par des réacteurs pour la médecine nucléaire, avec lesquels on effectue 20 millions d'essais de diagnostics chaque année dans le monde.
- Dans le domaine de la science et du génie des matériaux, la mise au point des techniques de diffusion des neutrons dans le réacteur NRU de Chalk River, qui a valu à Bertram Brockhouse le prix Nobel de physique en 1994, a permis de déterminer rapidement et de façon non destructive les propriétés métallurgiques et mécaniques des composants comme les aubes de turbine.
- Dans le domaine de l'agriculture, la technique de stérilisation des insectes, dans laquelle le Canada a joué un rôle principal de mise au point, a permis de lutter contre le carpocapse de la pomme des vergers de Colombie-Britannique et la lucilie bouchère qui infestait le bétail en Libye, et d'éliminer la mouche tsé-tsé, parasite du bétail sur l'île de Zanzibar. Les irradiateurs au

cobalt 60 sont également utilisés dans les applications en agriculture aussi variées que la stérilisation du matériel d'apiculture infecté et la destruction des parasites dans la laine.

- Dans le domaine de l'industrie minière, on a recours à l'activation neutronique pour analyser de façon peu coûteuse et rapide les échantillons de minerai.
- Dans le domaine de l'industrie pétrolière, la diagraphie par radio-isotopes et la radiographie des pipelines sont des outils importants.
- Dans de nombreuses industries de fabrication, allant du papier fin aux avions à réaction, on utilise la technologie nucléaire pour la radiographie, le contrôle de procédé et l'assurance qualité.
- Dans le domaine de la protection de l'environnement, on utilise la technologie nucléaire pour déceler et mesurer tout un éventail de polluants industriels.
- Dans le domaine de l'industrie alimentaire, l'irradiation des viandes et des fruits pour stériliser, prolonger la durée de conservation et empêcher l'intoxication mortelle éventuelle est de plus en plus jugée bénéfique. Cette technologie a été créée à EACL. Elle est maintenant utilisée sur les produits de la terre, la volaille et les viandes rouges aux États-Unis pour réduire le nombre de maladies, récemment estimées à 33 millions par an, qui sont attribuables à la contamination microbienne des aliments.
- Dans le domaine de la stérilisation des dispositifs médicaux, comme les cathéters spécialisés, les outils chirurgicaux, les fils de suture et les prothèses, les sources de cobalt 60 sont très utilisées. Près des deux tiers des irradiateurs pour toutes les applications médicales et agricoles et leurs sources de cobalt 60 proviennent du Canada.
- Dans les maisons, les détecteurs de fumée comportant des sources radioactives sauvent des vies humaines.

La question est de savoir si les avantages de la recherche en science nucléaire sont bien maîtrisés et si l'on peut obtenir quelque chose de plus en continuant à bénéficier de l'appui gouvernemental dans ces secteurs. De nombreux exemples indiquent que les débouchés à venir seront aussi importants que ceux du passé.

Les critiques de l'industrie nucléaire affirment que le stockage des déchets radioactifs au Canada et les problèmes de gestion d'*Ontario Power Generation* (OPG) relativement à ses réacteurs constituent des exemples de problèmes inhérents à la technologie nucléaire. En fait, ces problèmes ont été abordés. La gestion et le stockage permanent des déchets ont fait l'objet de recherches poussées et d'un examen public, et le gouvernement fédéral avait annoncé son intention de présenter son option préférentielle pour le traitement des déchets d'ici la fin de 1999. Quant à *Ontario Power Generation*, qui avait des problèmes de gestion relativement à ses réacteurs, elle remet actuellement à neuf ses centrales et a élaboré un plan selon lequel tous ses réacteurs mis sous cocon seront remis en service, à commencer par la tranche Pickering A en 2001.

2.3 EXIGENCES ACTUELLES ET FUTURES DE LA R ET D NUCLÉAIRE

La perspective sur la nature fournie par la science nucléaire restera un avantage vital. Les connaissances fournies par la science nucléaire sur la nature de la matière continuent à offrir des possibilités sur les nouvelles technologies et à fixer des limites sur celles-ci. Si l'on n'appuyait pas la recherche sur la science nucléaire au Canada, on créerait une dépendance vis-à-vis d'autres pays pour obtenir ces renseignements essentiels et on réduirait notre compétitivité industrielle, non seulement dans les secteurs reconnus comme «nucléaires», mais également dans de nombreux autres secteurs. La plupart des Canadiens ne savent pas jusqu'à quel point les produits de la science nucléaire appuient leur vie de tous les jours, ni jusqu'à quel point la science nucléaire est encore capable de contribuer au développement futur de notre économie.

Pour l'avenir, l'importance de la science et du génie nucléaires pour la nation doit être prise en compte dans le contexte de tout un éventail de recherches universitaires, agricoles, industrielles et dans les sciences fondamentales. Les besoins de sources d'énergie non polluante et de poursuite des études scientifiques dans la structure fondamentale de la matière ne sont que deux des exemples probants de ces activités. Le fait que l'industrie nucléaire et les universités ont des besoins en commun nécessite une politique nationale dans laquelle les ressources sont partagées comme ce sera le cas du Centre canadien de neutrons proposé.

2.3.1 Questions économiques

Jusqu'en 1990, pour chaque dollar (US) dépensé pour la R et D sur l'énergie nucléaire au Canada, 254 kWh d'électricité avaient été produits dans les centrales nucléaires, tandis que le chiffre comparable aux États-Unis n'était que de 140 kWh. Le rapport canadien d'électricité produite par dollar dépensé en R et D est supérieur à celui de n'importe quel autre pays ayant un programme électronucléaire d'envergure. Ainsi, le financement en R et D nucléaire canadien a été utilisé de façon efficace.

L'énergie nucléaire fournit actuellement 14 % de l'électricité du Canada, et environ 48 % dans le cas de l'Ontario, la province qui représente 40 % du produit intérieur brut (PIB) du pays. La part de l'électricité d'origine nucléaire au PIB sur la période allant de 1962 à 1992 a été de 23 milliards de dollars par rapport à l'aide gouvernementale de 4,7 milliards de dollars de 1952 à 1992. Par le passé, les coûts unitaires totaux de l'énergie des réacteurs d'OPG ont été inférieurs à ceux des centrales au charbon, bien que ceci n'ait pas été vrai pour les deux dernières années en raison des faibles performances des réacteurs de l'Ontario et de la chute du coût des combustibles fossiles. Toutefois, une étude récente de RNCan montre que l'électricité provenant des nouveaux réacteurs CANDU serait concurrentielle par rapport à celle des centrales à turbine à gaz à cycle mixte et des centrales au charbon dans le centre du Canada. À un taux d'escompte réel de 5 %, les coûts unitaires moyens de l'énergie [1] projetés pour de nouvelles centrales sont de :

Réacteur CANDU 9 (2 x 880 MWe)	3,42 cents (Cdn)/kWh
Réacteur CANDU 6 (2 x 665 MWe)	3,98
Turbine à gaz à cycle mixte (2 x 750 MWe)	4,44
Charbon (4 x 750 MWe)	431

Il est vraisemblable que les coûts de production d'électricité d'origine nucléaire d'OPG vont baisser à nouveau quand les réacteurs mis sous cocon seront remis en service et fonctionneront à des facteurs de charge élevés. OPG est déterminée à obtenir le même succès que la *Tennessee Valley Authority* aux États-Unis, qui a maintenant remis en service tous ses réacteurs mis sous cocon. En bref, la poursuite de la production d'énergie nucléaire à partir des centrales existantes tout au long de leur durée de vie et la construction de nouvelles centrales continueront à être économiques.

En prenant de l'âge, les centrales CANDU existantes continuent à avoir besoin d'un appui de R et D de façon à surveiller le comportement des matériaux et composants irradiés afin d'assurer une exploitation sûre et économique et de faire face aux événements imprévus. Un exemple de l'appui rapproché assuré par la R et D et de l'importance économique de cet appui est donné par la fissuration de la grille d'extrémité de la grappe de combustible au cours des deux premières années d'exploitation de la centrale nucléaire Darlington. Les ingénieurs et les scientifiques d'EACL et les compagnies d'électricité ont modélisé et caractérisé le problème et pris des mesures correctrices dans de brefs délais. À Darlington, si l'on n'était pas parvenu à résoudre le problème, on aurait mis en péril le projet de plusieurs milliards de dollars. Cette vitesse de résolution n'aurait pas été possible sans la participation des ingénieurs et scientifiques compétents d'EACL et des compagnies d'électricité qui ont une connaissance parfaite des propriétés fondamentales des matériaux et des principes d'exploitation des réacteurs appuyés par les installations de recherche d'EACL.

Les aspects de gestion et de prolongement de la vie utile de la centrale et de préservation d'une marge de sûreté adéquate nécessitent tous l'appui continu de la R et D. L'importance qu'attachaient les compagnies d'électricité aux performances économiques à court terme des centrales semble avoir été au détriment de cette perspective à long terme essentielle. Il n'est pas évident que les compagnies d'électricité aient suffisamment de ressources de R et D pour résoudre le problème à la base, et il incombe maintenant à EACL de disposer d'une expérience en R et D suffisante pour traiter des questions qui surgissent. Les ressources de R et D d'OPG s'épuisent rapidement, tandis qu'Hydro-Québec et Énergie Nouveau-Brunswick ont toujours dépendu d'EACL. L'investissement canadien dans l'énergie nucléaire risque d'être annulé prématurément si la perspective à court terme persiste.

Aux États-Unis, le réacteur d'une vie utile de 60 ans devient une réalité concurrentielle. En Suède, un pays qui a annoncé publiquement qu'il abandonnait la production d'électricité d'origine nucléaire, Westinghouse a décroché récemment un contrat de cinq ans pour apporter des modifications aux réacteurs Ringhals afin de leur permettre de continuer à fonctionner. Si l'on veut que les réacteurs CANDU atteignent des objectifs de prolongement de vie utile semblables, EACL et les compagnies d'électricité devront effectuer des travaux de R et D supplémentaires.

2.3.2 Questions environnementales

L'importance de la production d'électricité d'origine nucléaire pour réduire au minimum les émissions de GES est traitée en détail au chapitre 3. Nous ne ferons que répéter ici que le Canada ne sera pas capable d'atteindre ses objectifs de Kyoto pour 2010 s'il ne dépend pas davantage de l'énergie nucléaire et que d'autres nations y parviendront si elles peuvent acquérir des centrales nucléaires plutôt que des centrales thermiques classiques (à combustible fossile). Le produit CANDU doit évoluer pour répondre aux changements rapides de l'environnement économique et géopolitique s'il doit continuer à être une option abordable pour le Canada et les clients internationaux des réacteurs CANDU.

2.3.3 Questions de réglementation

Le potentiel de R et D nucléaire est un critère pour l'autorisation et le fonctionnement sûr des centrales nucléaires sur toute leur vie utile. La CCEA prescrit que les détenteurs de permis démontrent qu'ils ont le potentiel de R et D essentiel au fonctionnement sûr des centrales nucléaires au Canada. Les installations d'EACL ont servi de ressource partagée aux compagnies d'électricité auxquelles l'organisme de réglementation peut poser ses questions. La CCEA ne dispose que d'un petit budget pour la recherche, dont une partie va aux contrats de recherche à ces installations. Quelles que soient les dispositions prises, il sera essentiel que la recherche associée à la sûreté continue à recevoir un appui. Une grande partie des travaux de R et D en sûreté et autorisation a été effectuée aux Laboratoires de Whiteshell. La fermeture de cet établissement sous-entend que les composants essentiels soient transférés aux LCR et il faut admettre que cette transition va représenter des coûts importants.

2.3.4 Questions sociales et politiques

Le gouvernement du Canada a utilisé son expérience nucléaire à son avantage dans la diplomatie internationale. Le Canada est membre du G-7 et, en tant que tel, il peut contribuer largement au développement de la communauté mondiale et peut particulièrement utiliser son expérience en science nucléaire pour que le monde soit plus sûr et pour améliorer le bien-être des sociétés particulières.

- Les initiatives de politique étrangère, comme la proposition de détruire le plutonium des armes nucléaires dans les réacteurs CANDU, ne sont possibles que parce que le Canada a un programme nucléaire. Il est très improbable que la Russie fasse détruire son stock de plutonium aux États-Unis. Par contre, elle est prête à le faire détruire, tout comme le plutonium américain, dans un pays tiers comme le Canada. Le public a une perception erronée de la nature du combustible à plutonium, qui se présentera sous la forme d'un mélange solide de plutonium et d'uranium fabriqué en Russie et aux États-Unis.
- Un des besoins économiques principaux des pays en développement est l'eau douce. Les réacteurs CANDU pourraient permettre de dessaler suffisamment d'eau pour les besoins agricoles, industriels et personnels des grandes populations. Un approvisionnement fiable en

eau douce pourrait bien être le moyen de stabiliser les sociétés en développement placées de façon stratégique en améliorant l'agriculture et le bien-être de leurs habitants.

- La Banque mondiale prévoit que la population du monde augmentera de 1,4 % par an et atteindra sept milliards en 2010. À la fois le milliard de personnes supplémentaires plus le milliard de personnes qui vivent actuellement dans une pauvreté extrême nécessiteront des sources d'énergie pour satisfaire leurs besoins. Les besoins énergétiques de ces populations à croissance rapide seront énormes au fur et à mesure qu'elles développeront leurs infrastructures. L'énergie nucléaire constituera une des solutions pour le développement et la stabilisation des sociétés appauvries et à croissance rapide. En 1997, l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) prévoyait que la production d'électricité à partir des centrales nucléaires ferait plus que tripler d'ici 2050 [2].
- En tant que signataire du *Traité sur la non-prolifération des armes nucléaires*, le Canada dépense environ 2 millions de dollars par an pour appuyer la R et D en matière de garanties internationales. La plupart de ces travaux sont exécutés aux LCR.

2.3.5 Évolution du réacteur CANDU

Afin de s'assurer que les réacteurs CANDU demeurent concurrentiels, EACL travaille à réduire les dépenses d'investissement et les coûts d'exploitation des modèles CANDU futurs, par le biais de sa R et D sur les cycles du combustible et les grappes de combustible avancés, les canaux de combustible améliorés, les nouvelles technologies de production d'eau lourde et les progrès récents dans la technologie de l'information et la constructibilité de la centrale. Une sûreté supérieure pour ces modèles résultera de la capacité de R et D à résoudre les questions génériques de sûreté et des caractéristiques de sûreté passive. Les améliorations nécessaires des performances des générateurs de vapeur et d'autres composants en dehors du réacteur continueront également à nécessiter des travaux de R et D.

À plus long terme, si elle veut demeurer concurrentielle, EACL doit mettre au point des modèles CANDU avancés intégrant des caractéristiques pour réduire les dépenses d'investissement et les coûts d'exploitation unitaires de 50 %. Pour atteindre ces objectifs ambitieux, EACL étudie les caractéristiques comme les cycles thermodynamiques directs, ce qui évite d'avoir à utiliser des générateurs de vapeur onéreux; les nouveaux caloporteurs à température supérieure, pour augmenter l'efficacité du cycle et pour réduire les dépenses d'investissement; et les canaux de combustible pour recevoir les caloporteurs à température supérieure. Sur le marché international, les nouveaux types de réacteurs CANDU doivent se mesurer aux nouveaux réacteurs à eau ordinaire qui se fondent sur la R et D effectuée dans les laboratoires nationaux des pays comme les États-Unis, la France, l'Allemagne et le Japon. La compétitivité du réacteur CANDU sur le marché international sera défavorisée s'il est évident qu'EACL ne bénéficie pas d'un appui en R et D semblable au Canada.

Si l'on veut s'assurer que le Canada dispose d'une énergie adéquate au XXI^{e} siècle, il faudra mettre en œuvre des méthodes qui reconnaissent non seulement les réalités des approvisionnements et les réalités d'ordre technique, économique et environnemental, mais qui suscitent également des nouvelles idées sur les moyens traditionnels de répondre aux diverses

demandes de services d'énergie. Le concept de l'électricité et de l'hydrogène comme devises énergétiques qui lient les sources d'énergie, les technologies de conversion et les technologies de service aux services d'énergie dont a besoin la population, peut constituer le fondement de cette nouvelle façon de penser. Une telle méthode offre la possibilité à l'énergie nucléaire de répondre aux besoins des secteurs énergétiques comme le transport et le dessalement, auxquels elle n'a pas contribué jusqu'ici. Ces points sont examinés plus en détail au chapitre 3.

2.3.6 Une installation nucléaire vitale

Un élément vital dans l'appui continu de la R et D CANDU est le remplacement d'ici 2005 du réacteur NRU par un nouveau réacteur de recherche, le CCN. Ce sujet est examiné en détail au chapitre 5.

2.4 COMMENT DEVRAIT-ON RENFORCER LA R ET D NUCLÉAIRE CANADIENNE?

Dans de nombreux pays, le modèle de programmes de R et D nucléaire réussis est celui du Laboratoire national, qui joue le rôle de promoteur et de conservateur des connaissances intellectuelles de la nation. Dans ces pays, l'appui accordé aux laboratoires nationaux ne consiste pas uniquement à soutenir l'infrastructure du laboratoire, il assure également le financement du gouvernement pour les activités qui visent directement l'intérêt national, comme les effets sur la santé des rayonnements, les programmes de dosimétrie et de radioprotection, la sûreté et la protection de l'environnement. Il est particulièrement important qu'une aide soit prévue pour ces activités au Canada étant donné que la technologie CANDU est unique en son genre. Par le passé, EACL a servi de Laboratoire nucléaire national. Toutefois, ces dernières années, elle a dû abandonner ses responsabilités et une partie du financement associé afin de se consacrer à son rôle, celui de fournisseur des réacteurs CANDU. Bien que ses responsabilités quant à la R et D non liée à la filière CANDU aient pris fin en grande partie, EACL continue à assumer la responsabilité du déclassement des installations qui, autrefois, servaient à d'autres buts et de la gestion des déchets qui ont été produits lors des missions qui n'étaient pas associées au réacteur CANDU.

Le financement, quoique réduit, qu'EACL reçoit maintenant du gouvernement est considéré par certains comme une subvention injuste du commerce CANDU, un commerce qui devrait prospérer ou péricliter de lui-même. Cet argument est valable si l'on considère la vente et l'appui du produit CANDU actuel. Toutefois, le Comité considère que les subventions, bien utilisées, peuvent être des outils valables du gouvernement pour appuyer les objectifs publics qui ont une constante de temps plus longue que celle que peut absorber le marché. Dans ce sens, les subventions sont des investissements à long terme dans la technologie future. La R et D nécessaire pour appuyer la conception des centrales nucléaires de l'avenir, tout comme les avions et les traitements médicaux de l'avenir, demande des décennies pour atteindre des résultats. Dans de tels cas, quand le temps nécessaire pour la mise au point est long ou que le résultat, tout en étant souhaitable, est trop incertain pour définir le produit pour le marché, une forme de subvention est nécessaire pour entretenir le concept. Ainsi, il y aura toujours des aspects de la

science et de la technologie nucléaires pour lesquels l'investissement public continuera à être nécessaire.

En considération de tous les avantages actuels et prévus des technologies nucléaires pour la société et l'économie, le Comité appuie le plus fort possible le maintien du financement de la R et D en science et génie nucléaires. Certains changements doivent être apportés de façon à classer l'appui gouvernemental futur en plusieurs catégories particulières avec certains niveaux de responsabilité précis. Le mécanisme de financement actuel d'EACL est devenu improductif dans ce sens qu'il a isolé, au Canada, la science nucléaire de la science en général.

Le financement qu'EACL reçoit actuellement, principalement pour la R et D, comprend en fait la responsabilité d'au moins six types différents d'activités :

- la gestion des installations nucléaires hors d'usage et des déchets hautement radioactifs résultant des collaborations antérieures avec les gouvernements américain et britannique, ainsi que de la production d'isotopes médicaux;
- une partie de la R et D prescrite par la CCEA pour l'autorisation des installations nucléaires et pour l'assurance de la sécurité du public;
- la R et D relative aux effets environnementaux et biologiques des rayonnements ionisants de faible activité;
- une partie de la R et D qui était assumée auparavant par les compagnies d'électricité exploitant des centrales nucléaires en vertu du partenariat du Groupe des propriétaires de centrales CANDU (GPC) pour l'appui à l'exploitation;
- la R et D à court terme pour appuyer les objectifs commerciaux immédiats; et
- la R et D à long terme pour appuyer les types de réacteurs avancés futurs ou les nouvelles applications de la technologie CANDU.

Les réductions progressives des subventions du gouvernement et des compagnies d'électricité à EACL au cours des dernières années, combinées aux obligations d'EACL relatives à la gestion des établissements ont imposé des limites et des contraintes de plus en plus grandes sur ses fonctions de R et D. Un mécanisme amélioré de financement gouvernemental ferait des distinctions entre le commerce CANDU et les questions du passé, et entre les questions de R et D associées aux affaires, à plus long terme et celles d'intérêt public.

2.5 RECOMMANDATIONS

Recommandation 1

Le Comité recommande à EACL que les négociations avec le gouvernement fédéral et les compagnies d'électricité relativement au financement futur de la R et D continuent à prendre en compte de ce qui suit :

1. Les responsabilités pour la gestion des déchets attribuables aux obligations antérieures et la production d'isotopes médicaux, ainsi que pour les installations nucléaires hors d'usage,

devraient être subventionnées séparément du commerce CANDU, qu'EACL continue à en assumer les responsabilités ou qu'elles soient confiées à un nouvel organisme de gestion du site.

2. Le financement de la R et D que la CCEA exige des demandeurs de permis pour l'autorisation et la sûreté et qui est effectuée essentiellement aux installations uniques d'EACL, devrait être assuré par des mécanismes qui n'imposent pas des charges excessives au commerce CANDU, plus lourdes que celles nécessaires pour ce commerce. Le Comité est d'avis qu'EACL, la CCEA, RNCan et les compagnies d'électricité qui exploitent des centrales nucléaires ont pour intérêt commun d'y veiller. Chaque partie devrait accepter une part des coûts associés et les compagnies d'électricité partenaires devraient être encouragées à demander des crédits d'impôts pour leurs dépenses dans cette recherche.
3. La recherche relative à la science nucléaire qui est d'intérêt public, comme les effets sur l'environnement et la santé des faibles doses de rayonnement ionisant, devrait être examinée et financée par des processus qui garantissent l'indépendance des chercheurs vis-à-vis du commerce CANDU et assurent leur responsabilité par des processus examinés par des confrères comme ceux qui s'appliquent à la recherche financée par le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie (CRSNG) et le Conseil de recherches médicales.
4. EACL et les compagnies d'électricité devraient créer leur partenariat naturel en R et D pour le soutien opérationnel et pour les questions de gestion et de prolongement de la vie utile de la centrale. Certaines questions à long terme seront difficiles à aborder par l'intermédiaire d'un plan commercial. Le financement gouvernemental d'un tel travail à long terme devrait se poursuivre avec un mécanisme approprié de responsabilités pour son établissement. Les compagnies d'électricité devraient chercher à obtenir un crédit d'impôts pour leur participation.
5. EACL devrait financer sa R et D à court terme, quand elle porte sur les produits actuels et les débouchés commerciaux immédiats, à partir des revenus du commerce CANDU.
6. Le financement public continu de la R et D nucléaire à long terme et fondamentale devrait être structuré dans le cadre du financement de la science canadienne en général. Ceci a déjà été fait pour le Programme de sciences des matériaux, autrefois une activité d'EACL qui a été transférée au CNRC.

2.6 BIBLIOGRAPHIE

1. B. Moore et S. Guindon, Ressources naturelles Canada, «Comparative Costs of Electricity Generation : A Canadian Perspective», *Bulletin de la SNC*, vol. 19, n° 2, pp. 12-15, avril-juin 1998.

2. *Global Energy Outlook, Key Issues Paper No. 1 : International Symposium on Nuclear Fuel Cycle and Reactor Strategy : Adjusting to New Realities*, Agence internationale de l'énergie atomique, IAEA SM-346, mai 1997.

CHAPITRE 3 : LES RÉACTEURS CANDU ET L'ENVIRONNEMENT

3.1 INTRODUCTION

Aujourd'hui, on se préoccupe beaucoup dans le monde entier du changement climatique du globe et du rôle des GES dans ce phénomène. Si cette question a fait l'objet de nombreuses discussions dans le passé, le consensus scientifique est maintenant clair : les émissions croissantes de GES, et particulièrement de dioxyde de carbone (CO_2) provenant de l'utilisation des combustibles fossiles, provoquent une augmentation des températures du globe qui, si l'on ne prend pas des mesures d'atténuation, entraîneront un changement climatique du globe avec les conséquences sociales et économiques graves qui en résultent [1, 2].

Parmi les éléments probants de cette conclusion il y a une solide corrélation entre la croissance du taux de consommation des combustibles fossiles, c.-à-d. les combustibles à base de carbone, et l'augmentation de la concentration de CO_2 dans l'atmosphère depuis à peu près 1850 à aujourd'hui [3].

Les préoccupations croissantes sur le changement climatique du globe ont entraîné un certain nombre de conférences internationales, des décisions et des accords au cours des quelque vingt dernières années. Ces activités ont abouti à une conférence internationale sur le changement climatique du globe à Kyoto, au Japon, en 1997 à laquelle les pays développés ont promis de réduire leurs émissions de GES à des niveaux inférieurs à ceux de 1990. En vertu du Protocole de Kyoto, le Canada s'est engagé à réduire les émissions de GES, sur la période de 2008 à 2012, de 6 % au-dessous des émissions canadiennes de 1990.

Certains prétendent que le lien entre le réchauffement du globe et la consommation de combustibles fossiles n'a pas été encore démontré de façon scientifique. Ce point de vue est généralement lié aux préoccupations selon lesquelles les restrictions injustifiées sur l'utilisation des combustibles fossiles, reposant sur des hypothèses sans fondement, auront elles-mêmes des conséquences économiques et sociales désastreuses. Toutefois, la prudence impose que les effets possibles du CO_2 et d'autres émissions de GES soient pris en compte parce qu'il est presque certain qu'ils seraient catastrophiques si un changement climatique important du globe se produisait.

Étant donné qu'une centrale nucléaire ne produit pas d'émissions de GES, l'énergie nucléaire offre un moyen de satisfaire les besoins énergétiques d'une société industrialisée sans ajouter de GES dans l'atmosphère. Ainsi, la question du changement climatique du globe offre l'occasion de prolonger la durée de vie des centrales nucléaires actuelles et de promouvoir la croissance future de l'énergie nucléaire pour répondre aux besoins énergétiques sans cesse croissants du monde entier.

D'autres questions environnementales, p. ex. la limitation des rejets de substances radioactives, la gestion et le stockage des déchets nucléaires et le déclassement des installations nucléaires, ont été traitées dans les rapports antérieurs du Comité et ne sont pas étudiées ici. Toutefois, le Comité réitère ses conclusions précédentes selon lesquelles ces sujets sont gérés de façon appropriée.

3.2 ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE ET RÉACTEUR CANDU

3.2.1 Émissions de gaz à effet de serre au Canada et rôle des réacteurs CANDU

Les principaux responsables des GES au Canada sont le dioxyde de carbone (CO_2, 77 %), le méthane (CH_4, 12 %) et les oxydes d'azote (NO_x, 10 %). Les émissions de GES sont principalement causées par les activités énergétiques (78 %) : utilisation finale de l'énergie (59 % provenant principalement du transport), production d'électricité (17 %) et stocks de combustibles fossiles (12 %) [4]. Au Canada, la production d'électricité est bien moins la cause des émissions de GES parce qu'environ 80 % de l'électricité du Canada est produite dans les centrales hydroélectriques et nucléaires, qui n'émettent pas de GES. Toutefois, ceci ne signifie pas que d'autres réductions des émissions de GES dues à la production d'électricité au Canada seraient négligeables comme nous le verrons.

Les émissions totales de GES au Canada en 1990 ont été estimées à environ 600 millions de tonnes (Mt) dont environ 450 Mt de CO_2. Les tendances actuelles indiquent que les émissions de CO_2 atteindront jusqu'à 540 Mt/an d'ici environ 2010 si aucune mesure d'atténuation n'est prise. En vertu du Protocole de Kyoto, le Canada s'est engagé à réduire les émissions de GES de 6 % au-dessous des niveaux de 1990 d'ici 2010, équivalant à une réduction des émissions de CO_2 d'environ 120 Mt/an au-dessous du scénario de «maintien du statu quo» en 2010.

Une centrale thermique au charbon type dans l'Est du Canada émettrait environ 8 kilotonnes de CO_2 par mégawatt-an. Par conséquent, un réacteur CANDU 6 qui fonctionnerait avec un facteur de charge de 80 %, à la place d'une centrale au charbon de même taille et de même facteur de charge, éviterait des émissions de CO_2 d'environ 4,5 Mt/an. En se fondant sur une telle analyse, les centrales CANDU du Canada ont évité des émissions de CO_2 de plus de 1 000 Mt, depuis que la première centrale a été mise en service dans les années 60, parce qu'on aurait probablement construit des centrales au charbon si on n'avait pas pu compter sur l'énergie nucléaire. Aujourd'hui, même si les centrales Pickering A et Bruce A sont mises sous cocon, les centrales nucléaires du Canada évitent des émissions de CO_2 de 70 Mt/an. Il est évident que le Canada aurait bien plus de difficultés à tenir ses engagements de Kyoto s'il ne continuait pas à disposer d'énergie nucléaire. En outre, il est essentiel dans ce but que les réacteurs mis sous cocon soient remis en service le plus tôt possible, étant donné que l'énergie de remplacement provient entièrement des centrales thermiques classiques (à combustibles fossiles)[1]. On éviterait alors des émissions de CO_2 allant jusqu'à 30 Mt/an, soit une part importante de la réduction totale nécessaire.

On doit se rappeler que, en plus des émissions de CO_2, les centrales thermiques à combustibles fossiles émettent d'autres polluants atmosphériques, particulièrement les oxydes de soufre et

---

[1] La réduction des GES sera moindre dans le cas des centrales au gaz et au mazout que dans celui des centrales au charbon, en raison des concentrations inférieures de carbone dans ces combustibles par rapport au charbon. Le Comité a estimé qu'un réacteur CANDU 6 éviterait environ 2,5 Mt/an d'émissions de CO_2 par rapport à une centrale thermique classique à vapeur alimentée au gaz et environ 1,7 Mt/an par rapport à une centrale à turbine à gaz à cycle mixte de rendement supérieur, toutes les deux de même taille et de même facteur de charge. Ces estimations ne comprennent pas les émissions de GES supplémentaires provenant de la production et du transport du combustible à gaz naturel.

d'azote, qui participent à la création des pluies acides et de smog. La mise sous cocon des réacteurs de l'Ontario et leur remplacement par des centrales thermiques classiques ont entraîné une augmentation importante des émissions de ces polluants. En 1998, à la suite de la mise sous cocon des centrales nucléaires Pickering A et Bruce A, les émissions d'oxyde de soufre ont augmenté de 15 % et les émissions d'oxyde d'azote de 30 % par rapport aux chiffres de 1997.

3.2.2 Mécanismes du Protocole de Kyoto et exportation de réacteurs CANDU

Selon le mécanisme du Protocole de Kyoto, le Canada peut obtenir les crédits de GES pour les exportations de réacteurs CANDU, à partager avec le pays client, bien que les détails restent à déterminer. De telles dispositions permettraient au Canada de respecter ses engagements de Kyoto tout en bénéficiant d'avantages économiques.

Les ventes internationales de réacteurs depuis 1990 peuvent être admissibles à de tels avantages, aussi les ventes récentes de réacteurs CANDU en Corée et en Chine s'appliqueront. En supposant que des centrales au charbon aient été construites à la place des centrales CANDU, les tranches 2, 3 et 4 de Wolsong et les deux tranches de Qinshan éviteront environ 23 Mt/an d'émissions de CO_2 d'ici 2004. En outre, le crédit pour une partie de cette réduction reviendrait au Canada pour aider à contrebalancer ses engagements de Kyoto. Les ventes de réacteurs CANDU en Corée, en Turquie et en Roumanie, si elles se matérialisent, seront également admissibles aux crédits. Les pays à forte population comme la Chine et l'Inde continueront à être les principaux pollueurs atmosphériques du monde. Ces pays et bien d'autres pays en développement construisent encore des centrales au charbon à grande échelle[2]. Le Canada a pour intérêt, tant environnemental qu'économique, à encourager ces pays à intégrer l'énergie nucléaire à leurs diverses sources d'énergie.

3.2.3 Mesures du gouvernement sur les engagements de Kyoto

Les gouvernements fédéral et provinciaux se sont entendus sur des méthodes d'élaboration de politiques pour permettre au Canada de répondre à ses engagements de Kyoto. Le Fonds d'action pour le changement climatique a été établi en 1998 avec un budget de 50 millions de dollars par an pendant trois ans, sous la responsabilité conjointe des ministres fédéraux de l'Environnement et des Ressources naturelles. Les objectifs principaux du fonds sont de jeter les fondations d'une stratégie de mise en œuvre nationale et de prendre des mesures rapides pour réduire les émissions de GES. Les activités ont commencé en avril 1998 et se déroulent rapidement.

Jusqu'ici, une partie essentielle des activités a porté sur des évaluations par «tables de concertation», des diverses questions par secteur, p. ex. agriculture, électricité et transports et par mécanisme, p. ex. analyse et modélisation, science et application et technologie. Ces évaluations sont effectuées par des équipes composées de divers intervenants. Pour chacun de ces domaines, un «document de base» est publié. Il résume l'état actuel du domaine et trace les grandes lignes des défis, des occasions et, s'il y a lieu, des meilleures pratiques. Les documents de base doivent être

---

[2] On prévoit que la puissance électrique installée en Chine passera de 214 000 MW en 1995 à 2 900 000 MW en 2000, la grande majorité des nouvelles centrales étant alimentées au charbon. (Voir *U.S. and Foreign Commercial Service Market Report, China Power Generation*, mars 1999.)

suivis à l'automne 1999 par des «rapports sur les options», qui résument les options, les scénarios de réduction des émissions, les risques, les coûts et les avantages et d'autres facteurs. De plus, RNCan entreprend un programme, «Avenir des technologies énergétiques 2030», pour élaborer un ensemble de visions du système énergétique du Canada de 2030 à 2050 et pour recenser les options technologiques à long terme qui pourraient modifier fondamentalement la relation entre la croissance économique et les émissions de GES. Finalement, toutes ces activités déboucheront sur une Stratégie nationale de mise en œuvre dont la publication est prévue en 2000.

Dans le cadre de ces activités, EACL et l'industrie nucléaire, représentées par l'Association nucléaire canadienne ont surtout participé à la «table de l'électricité» à laquelle les compagnies d'électricité sont représentées, à la «table de la technologie du changement climatique» à laquelle EACL est représentée, ainsi qu'à la «table sur les mécanismes de Kyoto». *Il est essentiel que l'importance de l'énergie nucléaire en tant qu'option essentielle pour la réduction des émissions de GES soit reconnue clairement dans les rapports sur les options et dans le programme Avenir des technologies énergétiques 2030.*

3.3 PRÉVISIONS DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE ET CONSÉQUENCES POUR LE CANADA

En 1997, RNCan a publié des «perspectives énergétiques» pour l'offre et la demande de l'énergie canadienne et pour les émissions de GES de 1995 à 2020 [5]. RNCan insiste sur le fait que ces perspectives ne sont pas des prévisions, qu'entre autres les politiques de l'énergie et de l'environnement ainsi que les politiques associées des gouvernements fédéral et provinciaux sont censées demeurer constantes sur cette période et que les coûts réels des combustibles fossiles sont également censés demeurer constants. Les perspectives ont pour but de donner une base par rapport à laquelle on peut évaluer les besoins et la forme de politiques supplémentaires.

RNCan prévoit un taux de croissance de 1 % par an dans la demande totale d'électricité au Canada au cours de cette période, soit une réduction importante par rapport aux 2,6 % par an enregistrés pour les 15 années précédentes. Cet organisme prévoit que les tubes de force des réacteurs existants à l'exception de Bruce 2 seront remplacés pour assurer à chacun une durée de vie totale de 40 ans, que ces réacteurs ne seront pas remplacés par d'autres réacteurs nucléaires à la fin de leur durée de vie et qu'aucune autre nouvelle centrale ne sera construite. Ce scénario sous-entend que la part de l'électricité nucléaire au Canada chutera d'environ 19 % en 1995 à 10 % en 2020. Ce scénario est également fondé sur aucun nouvel aménagement hydroélectrique à grande échelle, à l'exception du début d'un projet au Québec en 2019, sur le fait que la plupart des nouvelles centrales et des centrales de remplacement seront au gaz naturel (cycle mixte et cogénération) et au charbon (en utilisant la technique non polluante de l'utilisation du charbon) et sur le fait que les centrales thermiques classiques actuelles seront remises en état et sur le réaménagement de certaines centrales hydroélectriques. Finalement, l'organisme prévoit que les centrales d'énergie renouvelable répondront à environ 3 % des besoins en électricité en 2020.

Les prévisions de RNCan qui portent sur une plus grande dépendance des combustibles fossiles pour la production d'électricité, qui oublient le nucléaire et ne mentionnent qu'une faible

production d'énergie hydraulique, à quoi s'ajoute une augmentation de l'utilisation de combustible fossile pour le transport et l'industrie, entraînent inévitablement des augmentations importantes des émissions de GES, plutôt que les réductions prescrites. *On prévoit que les émissions totales de GES vont être supérieures de 19 % en 2010 par rapport à celles de 1990, plutôt qu'inférieures de 6 %, selon les engagements de Kyoto. De plus, les émissions de GES seraient supérieures de 36 % en 2020, les émissions dues à la production d'électricité devant augmenter, selon les prévisions, de façon importante après 2010, quand certaines centrales nucléaires seront mises hors service et remplacées par des centrales thermiques classiques. Il est évident qu'un tel scénario n'est pas acceptable du point de vue de l'environnement.*

Dernièrement, l'Office national de l'énergie (ONE) a établi des scénarios, pour l'énergie au Canada, qui émettent des hypothèses semblables à celles de RNCan, p. ex., aucun remplacement ni aucune nouvelle centrale nucléaire, mais des taux de croissance de l'électricité de 1,2 à 1,6 % par an avec des conclusions semblables, c'est-à-dire des augmentations importantes des émissions de GES d'ici 2025 [6]. Là encore, ce scénario n'est pas acceptable.

Il est clair que les stratégies d'émissions de GES élaborées pour le Canada doivent tenir compte du fait que les réacteurs mis actuellement sous cocon doivent être remis en service dès que possible, et que de nouvelles centrales nucléaires doivent être prévues si le Canada doit tenir ses engagements de Kyoto et limiter les émissions de GES au-delà de 2010. D'autres moyens d'éviter les GES, comme les sources d'énergie renouvelables, les améliorations du rendement et de la production d'énergie, et l'utilisation et le stockage de CO_2 dans des réservoirs souterrains, ne permettront pas d'atteindre les objectifs de Kyoto et d'assurer d'autres réductions au-delà de 2010.

Il est intéressant de comparer ces scénarios de RNCan et de l'ONE avec les points de vue du *US Department of Energy* (DOE), l'homologue de RNCan aux États-Unis. Dans un rapport sur les retombées économiques éventuelles du Protocole de Kyoto, le DOE déclare que les États-Unis doivent prolonger les permis d'exploitation des centrales nucléaires existantes et construire de nouvelles centrales d'une puissance de 40 000 MW s'ils espèrent atteindre l'objectif de Kyoto avec des émissions de GES inférieures de 7 % par rapport aux niveaux de 1990 d'ici 2012 [7].

3.4 AUTRES APPLICATIONS DES RÉACTEURS CANDU

3.4.1 Applications non électriques des réacteurs CANDU

Comme l'indique le Comité dans son rapport de 1997, le réacteur CANDU a été utilisé jusqu'ici principalement pour la production d'électricité. La seule exception a été la centrale Bruce A d'OPG, qui a produit de la vapeur pour la production d'eau lourde et pour le chauffage des produits agricoles, en plus de produire de l'électricité. Dans d'autres pays, les réacteurs nucléaires ont été utilisés pour le chauffage urbain et industriel. Néanmoins, à l'échelle mondiale, moins de 1 % de la chaleur produite dans les réacteurs nucléaires est utilisée à des fins autres que la production d'électricité.

Aujourd'hui, environ un tiers de la consommation d'énergie mondiale est utilisée pour la production d'électricité, dont 17 % sont produits par les centrales nucléaires. L'électricité nucléaire a déjà participé de façon considérable à la réduction des émissions de GES dans de nombreux pays, comme on le voit à la section 3.2.1 pour le Canada. On a estimé, comme l'indique la section 6.3 du rapport du Comité de 1997, que les centrales nucléaires du monde entier évitent environ 2 600 Mt/an d'émissions de CO_2, ainsi que de nombreuses mégatonnes par an d'oxydes de soufre et d'azote associés, en émettant l'hypothèse que des centrales au charbon auraient été construites s'il n'y avait pas eu de centrales nucléaires.

Toutefois, si l'énergie nucléaire doit fournir à l'avenir plus qu'une fraction relativement faible des exigences énergétiques totales du monde et doit participer sérieusement à la réduction des émissions de GES, il est évident qu'il faudra poursuivre les applications non électriques ainsi qu'électriques des réacteurs nucléaires.

Les applications non électriques que l'on peut envisager pour les réacteurs CANDU comprennent :

- le chauffage urbain - des études effectuées par EACL et d'autres montrent la faisabilité d'utiliser les réacteurs CANDU à cette fin;
- la production de chaleur industrielle et chimique - les réacteurs CANDU ont déjà été utilisés pour le chauffage industriel à la centrale Bruce A comme on l'a indiqué;
- le dessalement de l'eau de mer - une étude préliminaire effectuée par EACL a démontré les avantages économiques d'un réacteur CANDU à double usage, fournissant de l'électricité et de l'eau potable (obtenue à partir de l'eau de mer par un processus d'osmose inverse); et
- l'extraction du pétrole des sables bitumineux de l'Alberta - grâce à des progrès récents, les réacteurs CANDU semblent être adaptés pour l'extraction du pétrole des sables bitumineux.

En général, la méthode la plus rentable serait l'utilisation de centrales à double usage, c.-à-d. une centrale utilisée pour la production d'électricité et pour une autre application. C'est ce que l'on appelle généralement la cogénération.

De telles applications pour les réacteurs CANDU contribueraient à éviter les émissions de GES au Canada, mais elles ne sont pas prises en compte dans les rapports de RNCan et de l'ONE déjà mentionnés. Il y a des possibilités d'exportation de réacteurs CANDU pour ces autres applications, qui pourraient aider le Canada à atteindre les objectifs de Kyoto, tout en apportant des avantages économiques. Par exemple, de nombreux pays côtiers en développement ont une sérieuse pénurie d'eau douce. Il est à noter que l'AIEA encourage activement l'utilisation de l'énergie nucléaire pour le dessalement dans ces pays [8]. Ainsi, il y a un marché potentiel pour les réacteurs CANDU tant pour le dessalement de l'eau de mer que pour la production d'électricité.

On étudie dans la section suivante une sérieuse possibilité d'application accrue des réacteurs CANDU et un moyen supplémentaire d'éviter les émissions de GES.

3.4.2 Hydrogène et énergie nucléaire

Au Canada, environ 25 % de la demande d'énergie fournie est consacrée au transport, n'utilisant pratiquement que des produits pétroliers. L'énergie nucléaire ne participe pratiquement pas à ce secteur, à l'exception de la très petite quantité d'électricité utilisée dans les systèmes de transport en commun urbain et suburbain. Toutefois, un nouveau débouché intéressant s'offre à EACL : l'utilisation d'électricité d'origine nucléaire pour produire l'hydrogène par électrolyse qui est utilisée dans les piles à combustible alimentant les trains, les autobus, les camions et les voitures comme le décrivent R.B. Duffey et autres [9]. Le Comité considère que ce document est très important, car il donne une vision pour l'avenir, et il l'a examiné en détail. Le Comité est d'accord avec les résultats principaux obtenus dans ce document, qu'il a confirmés de façon indépendante, et appuie fortement ses conclusions principales.

L'hydrogène utilisé dans les piles à combustible pour propulser les véhicules est souvent considéré comme un moyen important de réduction des émissions de GES. Toutefois, ces estimations ne tiennent pas compte des problèmes pour l'environnement associés à la production d'hydrogène. Aujourd'hui, l'hydrogène est presque toujours produit commercialement par reformage du méthane à la vapeur, dans lequel le gaz naturel provenant des puits de gaz classiques est combiné à la vapeur produite dans les chaudières à combustible fossile classiques. L'extraction du gaz naturel des puits, son transport dans les gazoducs, le fonctionnement des chaudières et le processus de reformage lui-même sont tous accompagnés d'émissions de GES, ainsi que d'autres polluants atmosphériques. Par conséquent, si l'utilisation finale de l'hydrogène dans la pile à combustible peut ne pas provoquer d'émissions importantes de GES[3], ce n'est pas le cas de sa production à partir du gaz naturel. En fait, une analyse signalée par Duffey et autres indique que les émissions annuelles totales de CO_2 seraient supérieures dans le cas d'un véhicule hybride à pile à combustible alimenté en hydrogène par rapport à un véhicule à essence classique. On n'aurait aucun avantage, sinon réellement un désavantage, à utiliser l'hydrogène dans les piles à combustible pour réduire les émissions des véhicules, si on utilisait ce moyen pour produire l'hydrogène.

D'un autre côté, on peut produire l'hydrogène par l'électrolyse de l'eau, en utilisant l'électricité pour la séparer en ses éléments. Ce procédé produit non seulement de l'hydrogène sans émission de GES ou d'autres polluants atmosphériques, mais il permet également d'obtenir des sous-produits de valeur que sont l'oxygène et l'eau lourde. Pour s'assurer que le cycle complet de production d'hydrogène est exempt de GES, l'électricité doit provenir d'une énergie n'émettant pas de GES comme l'énergie nucléaire, hydroélectrique, solaire ou éolienne. Étant donné que ceci représenterait un nouveau marché nécessitant de nouvelles sources d'électricité, et étant donné que les possibilités de nouveaux aménagements hydroélectriques importants sont limitées au Canada, les réacteurs nucléaires sont la seule source d'électricité pratique qui pourrait produire de l'électricité à grande échelle pour cette application.[4]

---

[3] En fait, la vapeur d'eau, le seul produit émis par une pile à combustible, est également un gaz à effet de serre. Toutefois, ses propriétés de saturation l'empêchent de s'accumuler dans l'atmosphère.

[4] Les énergies renouvelables comme l'énergie éolienne et l'énergie solaire, sont handicapées par deux lacunes inhérentes pour qu'elles soient utilisées comme source d'électricité fiable à grande échelle : leur faible intensité et leur intermittence. Pour pouvoir utiliser ces sources de façon fiable et à grande échelle au Canada il faudrait des terrains vastes, de grandes quantités de matériaux et des grandes capacités de stockage, toutes ces conditions

Duffey et autres ont calculé la production d'hydrogène à partir d'une usine d'électrolyse à l'échelle commerciale centralisée, alimentée en électricité à partir d'un réacteur CANDU 6 spécialisé. Si l'on prend une usine d'électrolyse fonctionnant avec un rendement de 70 % et un réacteur CANDU 6 fonctionnant avec un facteur de marche de 80 %, on produirait environ 97 kilotonnes d'hydrogène par an. De plus, le procédé d'électrolyse permet également de produire environ 95 t/an d'eau lourde et environ 770 kt/an d'oxygène. En outre, l'hydrogène pourrait être produit localement dans des petites installations d'électrolyse en utilisant l'énergie des heures creuses provenant de réacteurs CANDU polyvalents ou d'autres sources n'émettant pas de GES.

En se fondant sur les données relatives aux distances parcourues annuellement par des automobiles et des camions légers au Canada, et sur le calcul des besoins annuels d'hydrogène pour de tels véhicules alimentés par des piles à combustible, Duffey et autres montrent également qu'un réacteur CANDU 6 qui fonctionne avec un facteur de charge de 80 % pourrait fournir l'hydrogène nécessaire pour environ 660 000 véhicules à pile à combustible. En supposant un programme de 20 nouveaux réacteurs CANDU 6 spécialisés pour ce service, environ 13 millions de véhicules au total pourraient être alimentés. À titre de comparaison, le nombre total d'automobiles et de camions légers au Canada était d'environ 15,5 millions de véhicules en 1995.[5] En supposant que les 20 nouveaux réacteurs CANDU 6 soient mis en service au rythme de un par an, à compter d'environ 2005, et qu'un parc de 13 millions de véhicules à pile à combustible soit construit graduellement, Duffey et autres montrent que les émissions de CO_2 provenant de ces véhicules seraient réduites d'environ 45 Mt/an d'ici 2020, et d'environ 80 Mt/an d'ici 2030, par rapport aux émissions des véhicules alimentés par des moteurs à essence classiques.

Bien sûr, de nombreux défis subsistent, et notamment la mise au point de véhicules à pile à combustible économiques, fiables et sûrs ainsi que l'infrastructure pour alimenter et entretenir ces véhicules de façon économique, pratique et sûre. De nombreuses difficultés et incertitudes sont associées à l'économie d'un tel changement fondamental, et notamment celles associées aux dépenses en capital importantes nécessaires pour la construction des véhicules, la production et le transport de l'hydrogène et la construction de centrales nucléaires. Néanmoins, les analyses préliminaires indiquent que les coûts d'achat et de fonctionnement des véhicules à pile à combustible seraient raisonnables.

Dans ce sens, EACL a indiqué que certaines difficultés associées à l'adoption des piles à combustible pour les véhicules privés pourraient être évitées en convertissant les locomotives diesel en locomotives à pile à combustible [10]. Bien sûr, d'autres possibilités de réduction des émissions de CO_2 existent dans d'autres secteurs du transport commercial, comme les gros camions et les autobus.

---

demandant des coûts très élevés. La seule utilisation potentiellement faisable de tels types d'énergie est de servir de sources auxiliaires aux centrales nucléaires et hydroélectriques pour produire de l'électricité afin d'obtenir de hydrogène à l'échelle locale en quantité limitée, selon les disponibilités.

5 En fait plus de 13 millions de véhicules pourraient être alimentés, étant donné que l'électricité en période creuse provenant des réacteurs CANDU[MD] polyvalents pourrait être utilisée pour l'électrolyse de l'eau.

Nous voyons qu'il existe des possibilités intéressantes pour adapter les systèmes de transport du Canada actuellement à combustibles fossiles, à l'hydrogène électrolytique. Le Canada possède tous les éléments essentiels pour jouer un rôle important dans une révolution mondiale dans la mise au point du transport non polluant. Le Canada dispose de centrales nucléaires CANDU pour produire l'électricité nécessaire aux électrolyseurs à grand rendement construits par *Stuart Energy Systems* (autrefois *Electrolyzer Corporation*). Ceux-ci fourniront l'hydrogène pour la technologie des piles à combustible la première au monde de *Ballard Power Systems* qui permettra d'alimenter les voitures, les camions, les autobus et les trains. En jouissant des avantages résultant du rôle de précurseur qu'il a joué dans ces technologies de pointe, le Canada serait dans une excellente position pour exploiter les marchés mondiaux dans ces secteurs.

3.5 POINTS DE VUE INTERNATIONAUX SUR L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE ET LE CHANGEMENT CLIMATIQUE

Comme l'indique la section 6.3 du rapport du Comité de 1997, on estime que les centrales nucléaires du monde entier évitent maintenant environ 2 600 Mt/an d'émissions de CO_2, ainsi que des millions de tonnes d'émissions d'oxydes de soufre et d'azote. En se fondant sur ces observations, le monde entier reconnaît le rôle vital de l'énergie nucléaire pour faire face à la question du changement climatique du globe. Certains points de vue sont résumés ici.

La *Royal Society* et la *Royal Academy of Engineering* ont récemment effectué une étude sur l'avenir de l'énergie nucléaire au Royaume-Uni [11]. Elles ont conclu qu'il était vital que l'option nucléaire reste d'actualité comme une des méthodes pour atténuer la menace d'un changement climatique radical et que les centrales nucléaires doivent faire partie de la planification d'électricité pour le Royaume-Uni. En outre, elles ont estimé qu'une taxe énergétique envisagée pour le Royaume-Uni était une grave erreur, étant donné qu'elle ne faisait pas la distinction entre les sources d'énergie présentant divers niveaux d'émissions de CO_2. Ces deux organismes ont favorisé plutôt une taxe sur le carbone. Finalement, ils ont recommandé qu'un organisme international soit mis sur pied, appuyé par chaque nation en fonction de son produit intérieur brut et de sa consommation d'énergie en vue de financer la recherche sur l'énergie dans le contexte du changement climatique du globe.

L'*Atlantic Council* des États-Unis, un réseau politiquement indépendant de chefs de file de diverses administrations, universités et entreprises, a effectué récemment une étude d'envergure sur le rôle global de l'énergie nucléaire [12]. Une conclusion de cette étude est que les installations d'énergie nucléaire soient récompensées pour leur participation à la réduction des GES et que les gouvernements s'assurent que les coûts extérieurs intégraux de toute forme de production d'électricité soient intégrés dans les tarifs d'électricité. Le conseil a également conclu que les gouvernements devraient jouer un rôle de chef de file en ce qui a trait aux besoins à long terme en R et D pour toutes les options d'énergie.

Plusieurs autres groupes et organismes, comme le *Nuclear Energy Institute* (États-Unis), le *US President's Council of Advisers on Science and Technology*, le Club de Rome et le *Group of American Nobel Laureates in the Sciences*, ont exprimé leur inquiétude sur les émissions de GES et autres effets sur l'environnement de la combustion des combustibles fossiles et ont déterminé que

l'énergie nucléaire était un élément essentiel dans toute stratégie visant à réduire de telles émissions.

3.6 CERTAINS POINTS DE VUE CANADIENS SUR L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE ET LE CHANGEMENT CLIMATIQUE

La Conférence sur l'avenir de l'énergie nucléaire au Canada, organisée par le groupe de recherche sur l'innovation, les sciences et l'environnement de l'université Carleton (CRUISE) a eu lieu à Ottawa du 30 septembre au 1er octobre 1999. Il est ressorti à l'unanimité de la Conférence que l'avenir de l'énergie nucléaire au Canada sera déterminé par l'interaction de plusieurs facteurs et notamment :

- les conséquences de la déréglementation du marché de l'électricité, spécialement en Ontario, qui axera l'industrie sur le rendement du capital investi à court terme;
- la capacité d'EACL à réduire les dépenses d'investissement et les périodes de construction des nouvelles centrales CANDU;
- les décisions politiques prises au Canada pour parvenir à réduire les GES afin d'atteindre les objectifs de Kyoto ainsi que ceux à long terme;
- les modifications essentielles des processus de réglementation nucléaire pour prendre en compte les changements rapides du marché de l'électricité; et
- le degré d'adhésion du public à l'option nucléaire.

On s'accordait généralement sur le fait que les centrales CANDU actuelles continueront à produire une électricité concurrentielle.

La conférence et d'autres réunions tenues en 1999 indiquent au Comité que d'autres reconnaissent également que l'énergie nucléaire est un élément vital pour résoudre le problème du changement climatique et demeure une option technique viable.

3.7 CONCLUSIONS

Il ressort des études citées que l'énergie nucléaire doit jouer un rôle important dans les efforts faits par le Canada pour respecter ses engagements de Kyoto, soit une réduction de 6 % des émissions de GES au-dessous des niveaux de 1990 d'ici environ 2010. Il est évident, selon les prévisions de RNCan et de l'ONE que le Canada ne sera pas capable d'atteindre son objectif de Kyoto sans que les réacteurs d'OPG mis sous cocon ne soient remis en service, sans que la vie utile des réacteurs existants ne soit prolongée et sans que de nouvelles centrales nucléaires ne soient construites. Les nouvelles centrales nucléaires seraient utilisées pour éliminer progressivement les centrales au charbon et au mazout, pour répondre aux nouvelles demandes d'électricité et répondre aux applications non électriques de l'énergie nucléaire.

De plus, la synergie de l'énergie nucléaire et de l'hydrogène offrent des occasions très intéressantes pour que le Canada puisse jouer un rôle de chef de file dans une révolution du transport mondial dans laquelle les véhicules à pile à combustible remplacent les véhicules à essence et au diesel. Cette révolution repose entièrement sur des technologies mises au point au Canada : les réacteurs CANDU, les électrolyseurs Stuart et les piles à combustible Ballard.

Plusieurs organismes internationaux de renom, et notamment la *Royal Society* et la *Royal Academy of Engineering* du Royaume-Uni ainsi que l'*Atlantic Council* des États-Unis, ont conclu que, pour aborder la question du changement climatique du globe, l'énergie nucléaire doit jouer un rôle important dans les plans d'énergie futurs.

Au Canada, la question du changement climatique présente à EACL de nouvelles possibilités d'accès au financement de la R et D relativement au rôle que joue l'énergie nucléaire en vue de respecter les engagements de Kyoto du Canada et de faire face aux émissions de GES au-delà de 2010.

Le Comité appuie fortement la participation d'EACL, en collaboration avec l'Association nucléaire canadienne, aux activités du changement climatique du gouvernement fédéral dans le but de s'assurer que l'énergie nucléaire est, et demeure à l'avenir, une composante essentielle de la stratégie de mise en œuvre du gouvernement fédéral en vue de respecter les engagements canadiens de Kyoto et d'aborder les questions du changement climatique actuel.

Le Comité appuie fermement la collaboration d'EACL avec l'industrie canadienne pour la mise au point d'électrolyseurs ainsi que ses travaux de recherche et ses études relatifs à la production électrolytique d'hydrogène pour les piles à combustible.

3.8 RECOMMANDATIONS

Recommandation 1

Le Comité recommande qu'EACL continue à collaborer avec RNCan dans l'établissement du programme Avenir des technologies énergétiques 2030 pour s'assurer que l'énergie nucléaire soit reconnue comme une composante essentielle des approvisionnements futurs en énergie du Canada et que cette reconnaissance se répercute dans les scénarios énergétiques futurs.

Recommandation 2

Le Comité recommande qu'EACL se consacre en priorité à étudier les possibilités d'obtenir un financement pour la R et D d'autres organismes, relativement au rôle que peut jouer l'énergie nucléaire vis-à-vis des questions du changement climatique du globe, ainsi que sur l'utilisation des réacteurs CANDU pour la production électrolytique d'hydrogène.

Recommandation 3

Le Comité recommande qu'EACL continue à évaluer le potentiel, au Canada et à l'étranger, des applications non électriques des réacteurs CANDU, particulièrement pour le dessalement de l'eau de mer et détermine et appuie, selon les besoins, la R et D nécessaire pour poursuivre ces applications.

Recommandation 4

Le Comité recommande qu'EACL étudie les possibilités de collaboration avec d'autres organismes internationaux pour effectuer de la R et D relative à l'énergie et au changement climatique du globe, comme le préconisent la *Royal Society* et la *Royal Academy of Engineering* du Royaume-Uni ainsi que l'*Atlantic Council* des États-Unis.

3.9 BIBLIOGRAPHIE

1. Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, groupe de travail III, *Résumé à l'intention des décideurs, Deuxième rapport d'évaluation*, août 1996.

2. R. van Berkel, *A Primer on Climate-Relevant Technology Transfer*, Agence internationale de l'énergie, mai 1997.

3. D. Pendergast, *The Greenhouse Effect*, EACL, janvier 1992.

4. *Technology Innovation for Mitigating Greenhouse Gas Emissions, Technology Table Foundation Paper*, Secrétariat du changement climatique, Ottawa, 30 octobre 1998.

5. *Perspectives énergétiques du Canada : 1996 - 2020*, Ressources naturelles Canada, avril 1997.

6. *L'énergie au Canada, offre et demande jusqu'en 2025*, Office national de l'énergie, 1999.

7. *Nuclear Energy Insight 98*, Nuclear Energy Institute, décembre 1998.

8. *Plan for Producing Potable Water Economically*, Agence internationale de l'énergie atomique, Conférence générale, article 16, août 1999.

9. R.B. Duffey, W.T. Hancox, D.R. Pendergast et A.I. Miller, *Hydrogen and Nuclear Energy : Building Non-Carbon Bridges to the Future*, version révisée du document d'EACL présenté à la 9e Conférence canadienne sur l'hydrogène, Vancouver, février 1999.

10. A.I. Miller, *The Case for Rail Conversion to Hydrogen-Powered Fuel Cells in the Context of CO_2 Emission Abatement*, CAN Conference on Energy and the Environment, novembre 1999.

11. *Nuclear Energy - The Future Climate*, The Royal Society et The Royal Academy of Engineering, juin 1999.

12. *An Appropriate Role for Nuclear Power in Meeting Global Energy Needs, Policy Paper*, The Atlantique Council of the United States, février 1999.

CHAPITRE 4 : R ET D CANDU

Le Comité a examiné un certain nombre de secteurs de R et D CANDU cette année. C'est la première année que le Comité examine les sujets génériques et les questions de gestion des codes de calcul. Le Comité a également préparé les mises à jour des sujets traités les années précédentes, à savoir les canaux de combustible, les cycles du combustible avancés, la technologie de production de l'eau lourde et le concept CANDU X. On donne ci-après un résumé de l'examen de 1999. Une analyse détaillée de l'examen a été soumise séparément à EACL.

4.1 SUJETS GÉNÉRIQUES

En 1962, la CCEA a établi une prescription pour l'analyse des conséquences de certaines défaillances hypothétiques dans les systèmes des réacteurs CANDU (c.-à-d. défaillances uniques des systèmes de procédés) et des mêmes défaillances hypothétiques des systèmes de procédés avec l'indisponibilité simultanée des systèmes de sûreté spéciaux (ou défaillances doubles). Cette prescription et ses prolongements ont servi de facteurs déterminants primordiaux pour l'orientation, la portée, les priorités et la profondeur des programmes de la technologie de la sûreté d'EACL. Il est à noter que cette prescription réglementaire a été imposée aux détenteurs de permis de la CCEA (c.-à-d. les trois compagnies d'électricité au Canada qui exploitent des centrales CANDU).

Au fur et à mesure que le processus d'autorisation des centrales de Pickering, de Bruce, de Gentilly et de Pointe Lepreau progressait au cours des années 70, la CCEA s'efforçait de consigner ses prescriptions dans un Document de consultation intitulé *Guide de réglementation proposée - L'analyse de sûreté des centrales nucléaires CANDU, C-6, juin 1980.* Les discussions entre la CCEA, les compagnies d'électricité et EACL sur la conversion du Document de consultation en Guide de réglementation pour s'appliquer aux nouveaux types de réacteurs CANDU ont commencé en 1980 et se poursuivent aujourd'hui.

Un résultat de l'évolution des prescriptions réglementaires pour l'analyse de la sûreté des réacteurs de puissance CANDU a été la décision par la CCEA en 1988 de commencer à répertorier et à publier les questions importantes qui avaient été soulevées lors du processus d'autorisation des centrales CANDU et qui étaient des sujets génériques. Ces sujets génériques (SG) ont été communiqués aux compagnies d'électricité et à EACL avec des demandes de plans et de calendriers pour les résoudre. L'analyse de ces questions de sûreté irrésolues est souvent complexe et demande beaucoup de temps et, dans la plupart des cas, des programmes de R et D sont nécessaires pour appuyer et valider les méthodes analytiques employées ainsi que leurs résultats. Dans son rapport annuel pour 1995, le Comité a examiné l'état des SG abordés à cette époque dans les programmes de R et D sur la sûreté d'EACL. La CCEA a déclaré récemment qu'il était primordial de résoudre rapidement les sujets lors du processus d'autorisation d'exploitation continue des centrales CANDU. De même, l'importance des nouveaux modèles de réacteurs CANDU 6 et CANDU 9 est évidente. En conséquence, le Comité a décidé que son rapport annuel pour 1999 comprendrait une étude plus exhaustive des SG et de leur situation qu'auparavant.

En janvier 1999, la CCEA a commencé à publier une série de Déclarations de position sur les SG. Ces déclarations répertorient les diverses questions de sûreté en cours et les mesures que le personnel de la CCEA envisage de prendre pour les régler de façon satisfaisante. Onze Déclarations de position de la CCEA ont maintenant été publiées et le personnel a l'intention de publier des déclarations semblables pour tous les SG en suspens, soit quatorze au total au 24 septembre 1999.

Le Comité est persuadé que les mesures actuellement en cours et celles qui devraient être mises en œuvre incessamment par EACL et les compagnies d'électricité permettront de clore avec succès tous les SG en suspens.

4.2 ADMISSIBILITÉ DES RÉACTEURS CANDU 9

En septembre 1994, EACL a demandé à la CCEA d'entreprendre un examen réglementaire de l'étude d'avant-projet de la centrale nucléaire CANDU 9, en tenant compte du fait que les clients étrangers éventuels de réacteurs prescrivent, comme première exigence préalable, une déclaration d'admissibilité dans le pays d'origine pour tout nouveau type de centrale nucléaire. L'objet de l'examen réglementaire était de passer en revue les éléments du réacteur CANDU 9 et de la méthode de demande d'autorisation proposée d'EACL qui pourraient empêcher l'autorisation d'un réacteur CANDU 9 au Canada. Le 15 janvier 1997, le personnel de la CCEA a publié une déclaration sur l'admissibilité des réacteurs CANDU 9, dans laquelle il conclut qu'il n'y avait aucun obstacle fondamental à l'autorisation du modèle CANDU 9 au Canada.

4.2.1 Travaux supplémentaires

La déclaration du personnel de la CCEA était fondée sur la documentation soumise par EACL relative à l'étude d'avant-projet du réacteur CANDU 9, acceptée comme l'équivalent de la phase d'avant-projet d'un projet réel. La déclaration a été faite en prévoyant qu'EACL mènerait à bien les activités de conception détaillée et d'évaluation nécessaires pour la préparation du «Rapport préliminaire d'analyse de sûreté» habituel exigé par les clients internationaux de tout fournisseur de réacteur de puissance.

La déclaration du personnel de la CCEA sur l'admissibilité du réacteur CANDU 9 donne une liste des travaux supplémentaires à résoudre. La CCEA prévoit de publier une mise à jour de sa déclaration d'admissibilité du réacteur CANDU 9 pour le milieu de l'année dans laquelle elle donnera ses conclusions sur les mesures prises par EACL relativement aux travaux supplémentaires.

4.2.2 Conclusions

Un examen réglementaire de l'étude d'avant-projet du réacteur CANDU 9 a été demandé par EACL en septembre 1994 pour déterminer s'il pouvait y avoir des obstacles importants à l'autorisation de la conception au Canada. Les membres du personnel de la CCEA et d'EACL ont décidé de collaborer en vue d'atteindre leurs objectifs respectifs et de s'acquitter de leurs responsabilités respectives. Le Comité félicite les membres du personnel de la CCEA et d'EACL qui ont mis au point ce processus.

Il est essentiel que le processus établi par le personnel de la CCEA et d'EACL continue sur sa lancée. Ceci nécessitera des efforts continus de la part des deux organismes.

Le règlement rapide d'un SG pertinent et l'exécution avec succès par EACL (et la clôture officielle ultérieure par la CCEA) des travaux supplémentaires décrits dans la déclaration de la CCEA du 15 janvier 1997 sur l'admissibilité du réacteur CANDU 9 assureront l'acceptation internationale de la conception. Pour atteindre cet objectif, EACL doit affecter les ressources adéquates et en particulier les ressources humaines appropriées.

4.3 GESTION DES CODES DE CALCUL POUR L'ANALYSE DE CONCEPTION ET DE SÛRETÉ

Au cours de l'année écoulée, le Comité a été invité par le personnel cadre d'EACL à assister à des réunions sur l'élaboration, l'application et la gestion de ses codes de calcul. Le Comité n'a pas rendu compte par le passé de ce sujet et a l'intention de l'examiner dans son prochain rapport annuel. En outre, le Comité ne traite ici que des codes associés à l'analyse de conception et de sûreté des réacteurs nucléaires. Dans le cadre de ce rapport, un code de calcul peut être défini comme «une expression mathématique du monde physique qui permet de simuler la conception et les performances du système».

Les codes de calcul pour l'analyse de conception et de sûreté appuient les éléments essentiels des activités commerciales d'EACL. L'objectif continu d'EACL consiste à élaborer et à tenir à jour un ensemble de codes homologués pour appuyer ses activités commerciales, comprenant les projets antérieurs et actuels ainsi que les nouveaux modèles et modes opératoires.

4.3.1 Codes de calcul d'EACL et leur élaboration

Plus de 600 codes de calcul ont été utilisés dans les processus de conception et d'autorisation des réacteurs CANDU et MAPLE. Toutefois, un nombre bien moins important est essentiel à leur processus d'autorisation et de conception dans les secteurs suivants : physique du réacteur, thermohydraulique, combustible et canaux de combustible, comportement des produits de fission et confinement.

Les codes de calcul principaux ont évolué au cours des ans. Des versions plus complexes des codes avec une meilleure assurance qualité et une validation plus exhaustive sont certifiées de temps à

autre pour utilisation en tant que versions «figées». L'élaboration continue des codes, dirigée par des experts techniques dans divers domaines, est nécessaire pour intégrer les progrès enregistrés dans la compréhension de la technologie et pour permettre l'évolution du produit. L'élaboration des codes de calcul entraîne souvent des programmes de R et D. La méthode fondamentale adoptée par EACL, qui a bien fonctionné au cours des ans, consiste à effectuer des expériences pour obtenir les connaissances et les données expérimentales nécessaires pour ses programmes de calcul principaux. À l'heure actuelle, environ un tiers des travaux effectués dans le cadre des programmes de R et D associés à la sûreté d'EACL et du GPC porte sur l'élaboration des codes de calcul.

4.3.2 Assurance qualité du logiciel

Étant donné que les codes de calcul ont des rôles cruciaux dans l'analyse de conception et de sûreté, les concepteurs et les organismes de réglementation doivent avoir une confiance absolue en leur exactitude et leur fiabilité. Un élément essentiel pour y parvenir est d'appliquer les principes et procédures de l'assurance qualité aux codes de calcul. EACL a établi une politique particulière pour l'assurance qualité des logiciels et publié le *Guide d'assurance qualité d'EACL* pour les programmes de calcul analytiques, scientifiques et conceptuels au début de 1998.

4.3.3 Validation des codes de calcul

Un défi important dans la validation des codes pour l'analyse de sûreté se présente dans le cas des scénarios d'accident qui entraînent des conséquences graves comme la dislocation du cœur à grande échelle ou la fusion du combustible. Les programmes expérimentaux pour étudier de tels scénarios sont très difficiles et onéreux. Les programmes internationaux conjoints constituent un bon moyen pour aplanir les difficultés et réduire les coûts dans de tels cas. Par exemple, EACL participe au programme international RASPLAV, qui effectue des expériences sur la fusion des matériaux réels du cœur du réacteur [1].

4.3.4 Analyse d'incertitude des codes

Quand on élabore des codes de calcul, il est important d'établir les incertitudes dans les prévisions des paramètres essentiels. Ceci est particulièrement important pour l'analyse de sûreté à des fins d'autorisation, pour lesquelles la CCEA exige une évaluation des incertitudes ainsi que des tolérances pour celles-ci. EACL élabore actuellement, avec d'autres organismes de l'industrie nucléaire, une méthode d'analyse de sûreté qui utilise la meilleure estimation, plutôt qu'une méthode prudente, avec une analyse d'incertitude plus rigoureuse fondée sur les statistiques, qui fournit des connaissances bien plus fiables sur les marges de sûreté.

La méthodologie actuelle marque un pas en avant important dans la validation des programmes de calcul et donne une analyse de sûreté plus informative, en fournissant des données fiables sur les marges de sûreté exactes pour les paramètres essentiels dans les scénarios d'accident. De telles informations tolèrent moins de conservatisme dans la conception des réacteurs, avec la possibilité de réduire les dépenses d'investissement et d'améliorer la souplesse d'exploitation sans mettre en péril la sûreté. De plus, en repérant les incertitudes ayant les plus grandes conséquences, cette méthodologie peut axer la R et D sur les secteurs qui importent réellement. La CCEA a récemment

déclaré qu'elle appuyait l'utilisation de cette méthodologie, tout en repérant certaines questions qui doivent être prises en compte.

4.3.5 Boîtes à outils standard de l'industrie

L'élaboration des codes prend beaucoup de temps et est très onéreuse. Il a été reconnu que l'industrie nucléaire canadienne ne peut pas se permettre d'écrire, d'homologuer et de valider des codes de calcul différents pour effectuer la même tâche. Une entente a été prise entre EACL, OPG, Énergie Nouveau-Brunswick et Hydro-Québec afin d'utiliser et de mettre à jour un ensemble unique des codes de calcul essentiels, à une seule exception près, pour l'autorisation et l'analyse de sûreté. La seule exception concerne les codes thermohydrauliques de base. EACL, Énergie Nouveau-Brunswick et Hydro-Québec continueront à utiliser le code CATHENA tandis qu'OPG continuera à utiliser le code TUF.

EACL sera chargée de mettre à jour, de fournir l'assurance qualité du logiciel et de valider six des principaux codes de la boîte à outils standard de l'industrie, tandis qu'OPG aura la même responsabilité dans le cas de quatre codes de la boîte à outils standard de l'industrie.

4.3.6 Comité de gestion des codes et Centre des codes d'EACL

EACL a établi le Comité de gestion des codes dont le mandat est de donner des conseils et des directives pour l'élaboration et l'application de codes d'EACL, d'approuver officiellement les codes validés dont la qualité est assurée (codes «figés») et d'assurer la surveillance et le leadership.

Une autre responsabilité du Comité de gestion des codes est de superviser la gestion du Centre des codes d'EACL. Pour EACL, le Centre des codes a pour but de rendre sa technologie plus facilement accessible aux universités, aux instituts et aux clients selon des conditions contrôlées. Par ce moyen, elle cherche à créer plus de possibilités commerciales, à intéresser les étudiants au domaine nucléaire et à rendre la technologie nucléaire plus familière et plus acceptable pour ceux qui sont extérieurs à l'industrie. Le Centre des codes fera le suivi des codes de calcul d'EACL, facilitera et supervisera le transfert de ces codes à des organismes extérieurs, facilitera le fonctionnement des groupes d'utilisateurs des codes principaux et servira de point de contact pour les organismes extérieurs sur les codes d'EACL.

4.3.7 Conclusions

L'élaboration et la mise à jour des codes de calcul, qui jouent un rôle important dans l'analyse de conception et de sûreté des réacteurs CANDU et MAPLE, reposent essentiellement sur les connaissances, l'expérience et le jugement d'experts dans les diverses disciplines techniques. Dans son rapport de 1998, le Comité a examiné un projet pilote sur la planification de succession du personnel clé. Tout en reconnaissant l'importance des codes pour EACL et la concurrence intense sur le marché pour les personnes ayant des compétences en informatique, on devrait utiliser cette démarche pour analyser l'expérience essentielle d'EACL dans les codes de calcul.

Le Comité approuve les efforts qu'EACL consacre à l'assurance qualité des logiciels. Le Comité est impressionné par la méthode adoptée par EACL pour l'évaluation des incertitudes relatives aux paramètres de sortie principaux des codes de calcul. Il estime que cette méthode a le potentiel d'éliminer tout conservatisme inutile dans la conception des réacteurs, d'améliorer la souplesse de fonctionnement des réacteurs et d'axer la R et D sur les secteurs les plus importants.

Le Comité appuie également l'établissement du Centre des codes d'EACL. Il estime qu'en rendant la technologie des réacteurs CANDU et MAPLE plus familière, cela permettra non seulement de promouvoir les débouchés commerciaux, mais aidera également à attirer des jeunes ingénieurs et scientifiques vers l'industrie nucléaire.

4.3.8 Recommandations

Recommandation 1

Le Comité recommande qu'EACL applique les méthodes élaborées dans son programme pilote sur la planification de la succession dans le but de conserver et d'entretenir son expérience essentielle.

Recommandation 2

Tout en reconnaissant les difficultés de certaines expériences nécessaires pour la validation des codes de calcul, le Comité recommande qu'EACL continue à participer aux programmes de R et D internationaux génériques appropriés.

Recommandation 3

Dans le but d'atteindre les objectifs du Centre des codes d'EACL, le Comité recommande qu'EACL élabore un programme et des mécanismes pour informer les utilisateurs éventuels de l'existence du Centre et des services qui seront fournis et pour leur donner d'autres informations pertinentes.

4.3.9 Bibliographie

1. Comportement du cœur fusionné avec refroidissement extérieur, Rapport final de la première phase du projet RASPLAV, Institut Kurchatov, Moscou, janvier 1998.

4.4 CANAUX DE COMBUSTIBLE

Le tube de force en alliage Zr-2,5 % Nb, maintenant utilisé dans tous les réacteurs CANDU, est le composant essentiel qui détermine la vie utile d'un canal de combustible. L'irradiation et l'absorption de deutérium, qui est due à la corrosion et à la dissociation du caloporteur à eau lourde, peuvent modifier considérablement la résistance et la ténacité à la rupture de cet alliage en certains endroits, le long d'un tube de force. De plus, pendant le fonctionnement normal du réacteur, le tube de force subit des modifications de longueur, de diamètre et de courbure (flèche).

La R et D sur l'inspection des canaux de combustible effectuée par EACL couvre trois décennies. Au cours de cette période, EACL a fourni le matériel et effectué ou supervisé des inspections de nombreux canaux en service ou en pré-service. Tous les tubes de force sont fabriqués et inspectés conformément aux spécifications d'EACL avant leur installation. L'emplacement du bracelet de centrage pose un problème d'installation. EACL a mis au point la méthode par courants de Foucault qui est utilisée par les installateurs des tubes pour confirmer l'emplacement du bracelet de centrage. Depuis 1986, Ontario Hydro (maintenant OPG) assure la majeure partie des inspections volumétriques périodiques en service qui sont effectuées sur les canaux de combustible des réacteurs CANDU, avec le concours de R et D d'EACL.

Les changements organisationnels récents à OPG ont porté entre autres sur la réduction des services d'inspection offerts aux autres compagnies d'électricité propriétaires de centrales CANDU. Pour combler ce vide et pour tirer profit des avances en R et D réalisées par EACL et d'autres dans les techniques d'inspection, EACL a conçu et construit un système d'inspection des canaux de combustible sous l'eau qui ne demande pas d'isoler les tubes de liaison ni d'utiliser des bouchons de glace. Le nouveau système, qui est deux fois plus rapide que le vieux système à sec, a été utilisé à l'automne 1999 pour inspecter l'échantillon d'un canal de combustible du réacteur CANDU 6 de Cernavoda 1 en Roumanie.

L'inspection périodique par des techniques non destructives ou destructives, de certains tubes de force des réacteurs en exploitation doit être appuyée par un programme de recherche sous-jacent sur la déformation, l'entrée de deutérium et les propriétés de rupture. Des progrès considérables ont été enregistrés dans les techniques d'inspection et dans la compréhension des statistiques sur les données des matériaux ainsi que dans l'élaboration de méthodes probabilistes. Le Comité pense que ceci entraînera des améliorations dans les équations de conception et que ce programme peut finalement ouvrir la voie à des changements dans les spécifications des matériaux et de fabrication qui réduiront la variabilité de la tenue à la déformation ou de l'absorption de deutérium.

4.4.1 Recommandations

Recommandation 1

En raison de l'importance croissante du prolongement de la vie utile des centrales et des méthodes et pratiques de remplacement des tubes, le Comité recommande qu'EACL continue à avoir un programme de recherche dans ce secteur pour appuyer les services d'inspection améliorés qu'elle offrira dorénavant aux propriétaires de centrales CANDU au Canada et dans d'autres pays.

Recommandation 2

Compte tenu des progrès réalisés dans la compréhension et l'application des méthodes probabilistes de description du comportement des matériaux et des tubes de force, le Comité recommande qu'EACL poursuive ses efforts pour développer et améliorer les équations actuellement disponibles qui permettront de décrire l'expansion diamétrale, l'allongement longitudinal et l'entrée de deutérium.

4.5 CYCLES DU COMBUSTIBLE NUCLÉAIRE AVANCÉS

EACL a consacré des ressources considérables dans le passé à la mise au point des cycles du combustible nucléaire avancés. En fait, le Comité a noté dans ses rapports passés (de 1993 à 1996) que la démonstration de la souplesse du cycle du combustible avec le réacteur CANDU constituera un avantage important pour la commercialisation, même dans les pays qui exploitent déjà des réacteurs à eau ordinaire.

Au cours de l'année écoulée, diverses étapes importantes ont été franchies et notamment :

- l'irradiation de 24 grappes de combustible CANFLEX dans un réacteur CANDU 6 pour démontrer son comportement dans les conditions d'exploitation normales d'un réacteur de puissance; et
- la fabrication des premières pastilles de combustible DUPIC (utilisation directe du combustible des REP dans le réacteur CANDU) à partir de combustible irradié réel aux LCR en utilisant le procédé OREOX (oxydation, réduction du combustible à oxyde enrichi) en vue de leur irradiation expérimentale dans le réacteur NRU.

4.5.1 Programme de mise au point du combustible CANFLEX

Le programme de mise au point du combustible CANFLEX a représenté un des efforts soutenus principaux d'EACL conduisant à l'utilisation de cycles du combustible avancés. Ce programme est maintenant entré dans la phase cruciale de l'irradiation de démonstration dans un réacteur de puissance en exploitation, aboutissant à la certification pour la mise en œuvre dans le cœur complet des réacteurs CANDU. L'irradiation de démonstration de 24 grappes a commencé en septembre 1998 à Pointe Lepreau et se poursuivra jusqu'en avril 2000, quand les grappes d'uranium naturel CANFLEX irradiées finales feront l'objet d'un examen après irradiation aux LCR.

Par rapport à la grappe de combustible actuelle à 37 éléments utilisée dans la plupart des réacteurs CANDU en exploitation, les nouvelles grappes CANFLEX offrent une puissance de canal critique bien supérieure, une puissance nominale maximale par élément inférieure et la capacité à préserver l'intégrité à des combustions massiques prolongées à haute puissance.

En plus d'ouvrir la voie aux cycles du combustible avancés, les grappes de combustible CANFLEX à uranium naturel peuvent être chargées économiquement dans les réacteurs CANDU en exploitation, parce qu'elles assurent des marges d'exploitation du réacteur supérieures. Ces marges pourraient éviter ou retarder la réduction de puissance en raison du vieillissement. Bien que les coûts de fabrication de la grappe CANFLEX (avec uranium naturel) puissent être au départ supérieurs de 10 à 15 % par rapport aux grappes de combustible à 37 éléments, les revenus supplémentaires attribuables à l'augmentation de la puissance des réacteurs en font un argument commercial solide.

Un autre avantage à court terme que présente le programme CANFLEX est la possibilité de commercialiser un combustible à faible réactivité cavitaire. Une telle grappe pourrait être chargée de façon pratique quand les réacteurs existants sont arrêtés pour le remplacement des tubes de force. Cette caractéristique pourrait être offerte en option pour les nouveaux réacteurs.

4.5.2 Option DUPIC

Pour que le cycle du combustible DUPIC devienne une réalité, on doit démontrer la faisabililté du recyclage du combustible irradié des REP directement dans un réacteur CANDU, du point de vue de la physique du réacteur. En particulier :

- la combustion massique réalisable dans un réacteur CANDU avec combustible irradié des REP doit être suffisante pour justifier le coût de la fabrication à distance et du stockage du combustible DUPIC;
- les paramètres de performance du combustible DUPIC doivent se situer dans l'enveloppe d'exploitation standard du réacteur CANDU (uranium naturel); et
- les coefficients de réactivité peuvent être différents, mais les dispositifs de réglage de la réactivité existants doivent être adéquats pour le contrôle-commande et la sûreté.

La mise au point du cycle DUPIC est effectuée en collaboration avec le *Korean Atomic Energy Research Institute* (KAERI) et le *Department of State* des États-Unis. Au cours des cinq dernières

années, la KAERI a effectué des analyses de physique du réacteur détaillées d'un réacteur CANDU 6 avec combustible DUPIC. L'étude du KAERI est fondée sur le stock hétérogène de combustible provenant de différents réacteurs à divers moments. Un des problèmes principaux liés à l'utilisation directe de ce combustible irradié réside dans la composition hétérogène des assemblages et dans le fait que jusqu'à 23 grappes CANDU peuvent être fabriquées à partir de chaque assemblage.

Il est clair que les variations dans la composition du combustible irradié des REP pourraient entraîner une grande incertitude dans les propriétés de la grappe de combustible DUPIC et résulter en une réduction importante de la marge d'exploitation. La résolution proposée de ce problème d'hétérogénéité consiste à mélanger la poudre à sa sortie du processus OREOX. De l'avis du Comité, la faisabilité de l'option DUPIC dans un réacteur CANDU 6 a été démontrée par la Corée, mais la poudre devrait être mélangée à suffisamment de combustible neuf (20 %) pour réduire l'hétérogénéité des grappes de combustible DUPIC.

Le Comité estime que le problème d'hétérogénéité lié à l'option DUPIC pourrait être éventuellement résolu sans avoir recours à un mélange avec l'uranium neuf, si l'on effectue un mélange de poudre DUPIC plus judicieux entre les assemblages.

4.5.3 Conclusions

Le Comité est d'accord avec EACL que l'on doit continuer à appuyer la R et D sur les cycles du combustible avancés. À court terme, l'option de l'uranium légèrement enrichi (SEU) présente les plus grandes possibilités d'amélioration des performances des réacteurs CANDU. Cette option comprend également l'utilisation de l'uranium récupéré lors du retraitement commercial du combustible des réacteurs à eau ordinaire. L'utilisation de combustible SEU entraîne non seulement des économies de coûts d'exploitation (jusqu'à 30 % des coûts d'approvisionnement en combustible), mais elle offre également un degré de liberté supplémentaire pour concevoir le combustible à faible réactivité cavitaire et pour réduire les dimensions du coeur.

Le cycle du combustible DUPIC semble être l'option à long terme la plus prometteuse.

4.5.4 Recommandations

Recommandation 1

Le Comité recommande qu'EACL étudie plus en détail la stratégie de mélange des poudres envisagée pour la grappe DUPIC, en considération des conséquences négatives liées à l'utilisation du combustible neuf dans la méthode actuelle.

4.6 TECHNOLOGIE DE PRODUCTION DE L'EAU LOURDE

L'utilisation de l'eau lourde comme modérateur est sans aucun doute la caractéristique essentielle du réacteur CANDU. Le modérateur à eau lourde sous-tend l'excellente économie neutronique du réacteur CANDU, dépassant celle de tout autre type de réacteur de puissance. L'excellente économie neutronique entraîne l'utilisation efficace de l'uranium extrait et permet d'utiliser les cycles du combustible avancés sans apporter de modifications importantes à la conception du réacteur CANDU.

Le Comité a examiné en détail la technologie de production d'eau lourde, l'offre et la demande, l'économie et les exigences de R et D dans son rapport de 1996 et a mis à jour cet examen dans son rapport de 1997. Dans ces rapports, le Comité a recommandé que l'on continue à appuyer de façon croissante la R et D sur les nouvelles technologies de production. Depuis lors, le Comité a été informé sur les progrès récents dans ce secteur et a visité le prototype d'usine CIRCE construit chez Air Liquide à Hamilton. Cette section donne l'état d'avancement et l'évaluation des activités d'EACL actuelles dans ce secteur.

Afin de répondre à la demande dans le cas de ventes prévues de réacteurs CANDU, EACL dispose de stocks d'eau lourde. Une partie de cette eau lourde est prêtée dans le cadre du projet de l'Observatoire de neutrinos de Sudbury. EACL invente de nouvelles technologies pour répondre à la demande future en se fondant sur le catalyseur hydrofuge breveté. EACL a également un stock d'eau lourde tritiée qu'elle a acquise lors de l'élaboration de ses programmes sur le prototype de réacteur. Certaines activités de R et D visent l'extraction de tritium de ce stock.

4.6.1 Nouvelles initiatives technologiques

À la section 6.2.1 de son rapport de 1997, le Comité a signalé qu'EACL travaillait sur les derniers détails d'une entente avec Air Liquide Canada pour mettre sur pied un prototype d'usine de sous-produit d'eau lourde de 1 Mg par an à partir de la production d'hydrogène d'Air Liquide à Hamilton. La construction de cette usine, le prototype d'usine CIRCE, était presque terminée et la mise en service commençait quand le Comité a fait une visite à l'établissement en septembre 1999.

L'usine utilise le procédé industriel combiné de reformage et d'échange catalytique (CIRCE) comme premier étage. L'hydrogène est produit dans un reformeur de méthane à la vapeur modifié, qui appartient à Air Liquide Canada, dans lequel l'alimentation de méthane réagit avec la vapeur à haute température pour produire de l'hydrogène et d'autres gaz. Après l'extraction des autres gaz, l'hydrogène passe dans un lit d'échange catalytique dans lequel on augmente la teneur en deutérium de l'eau qui circule à contre-courant. L'eau est alors acheminée vers un deuxième étage qui utilise le processus bitherme eau-hydrogène pour enrichir davantage l'eau en deutérium. Dans les troisième et quatrième étages, le procédé combiné d'électrolyse et d'échange catalytique (CECE) est utilisé pour produire l'eau lourde.

Comme le démarrage du prototype d'usine CIRCE approche, il est de plus en plus urgent d'élaborer une simulation par ordinateur de l'usine réelle. La simulation de l'usine réelle est nécessaire pour analyser les performances de l'usine en fonctionnement dans le but de démontrer qu'elle répond aux

attentes, pour permettre de résoudre les problèmes de fonctionnement et pour servir de base à la conception des usines CIRCE commerciales.

EACL propose la construction du Système de production d'eau lourde aux LCR pour extraire le tritium et reconcentrer l'eau lourde usée avec une capacité d'environ 300 Mg par an. La technologie que l'on utiliserait est une modification du procédé CECE, qui repose sur la technique d'échange eau-hydrogène dans lequel les contre-courants d'eau et d'hydrogène produit par électrolyse passent sur les catalyseurs hydrofuges mis au point par EACL pour augmenter la concentration de l'isotope de deutérium dans le circuit d'eau.

La technologie CECE que l'on va utiliser dans le Système de production d'eau lourde est également prise en compte pour les petites installations de détritiation d'eau lourde aux sites des réacteurs. En collaboration avec *Stuart Energy Systems* (qui faisait partie auparavant d'*Electrolyzer Corporation*), EACL met au point des électrolyseurs pour ces applications. De gros électrolyseurs centralisés, ainsi que des petits appareils locaux, seront également nécessaires pour réaliser l'économie d'hydrogène mentionnée à la section 3.4.2 du présent rapport. La mise au point de cellules électrolytiques pour toutes ces applications est subventionnée partiellement par le gouvernement fédéral, et l'essai de cellules électrolytiques améliorées est en cours à l'Université du Québec à Trois-Rivières.

Les travaux de R et D récents sur le catalyseur hydrofuge ont donné quelques résultats importants :

- Il est de plus en plus évident que l'activité du catalyseur a une durée de vie supérieure à celle prévue initialement. Plus sa durée de vie sera longue, et moins le catalyseur devra être réactivé ou remplacé, ce qui abaissera les frais d'exploitation.
- On a mis au point une méthode pour pulvériser le catalyseur sur l'écran support, ce qui réduira les coûts de production des lits catalytiques.
- On a réalisé une réactivation efficace des lits catalytiques avec un mélange d'oxygène circulant dans l'azote.

4.6.2 Conclusions

EACL a maintenant acquis de l'expérience dans l'utilisation des catalyseurs dans des conditions industrielles et les techniques sont prêtes à être démontrées au point de vue commercial.

Le Comité est d'accord avec les cadres supérieurs d'EACL qu'il y a encore de gros avantages à tirer de l'amélioration des performances des catalyseurs. Par conséquent, le Comité est convaincu qu'il est essentiel que l'on continue à appuyer la R et D sur le fonctionnement, la réactivation et la fabrication du catalyseur hydrofuge.

4.6.3 Recommandations

Recommandation 1

En raison de l'importance d'une simulation sur ordinateur du prototype conforme à l'exécution de l'usine CIRCE pour analyser ses performances, le Comité recommande que l'on accorde une haute priorité à la réalisation de cette simulation.

Recommandation 2

Le Comité recommande vivement qu'EACL continue à collaborer avec l'industrie canadienne pour la mise au point d'électrolyseurs améliorés et plus importants.

Recommandation 3

Reconnaissant qu'il y a encore d'importants avantages à tirer de l'amélioration des performances des catalyseurs hydrofuges, comme l'optimisation de l'activité catalytique, la réduction des coûts de fabrication, l'augmentation de la vie utile et la mise à l'échelle des conditions de procédé industriel, le Comité recommande vivement que l'on continue d'appuyer la R et D dans ce domaine.

4.7 CONCEPT CANDU X

Dans son rapport de 1996, le Comité a examiné l'objectif et la mise en œuvre de la stratégie d'EACL pour l'évolution de la conception du réacteur CANDU et le concept du réacteur CANDU avancé à long terme (CANDU X). Le Comité a revu le concept CANDU X dans son rapport de 1997 à la suite d'une modification apportée au caloporteur proposé.

L'objectif à long terme est d'obtenir des réductions dans les dépenses d'investissement et dans les coûts d'exploitation au-dessous de ceux des modèles de réacteurs CANDU actuels, tout en conservant les caractéristiques essentielles de la conception qui sous-tendent ses succès et qui l'ont rendu attrayant pour les clients, à savoir :

- modérateur à eau lourde séparé du caloporteur;
- canaux de combustible horizontaux dans les tubes de force; et
- renouvellement du combustible en marche en utilisant des grappes de combustible courtes.

Le concept CANDU X représente la vision à long terme d'EACL d'un type de réacteur révolutionnaire qui, tout en conservant les caractéristiques essentielles du réacteur CANDU, comprend des modifications quantitatives conçues pour atteindre les objectifs ambitieux de la Société relatifs aux coûts unitaires de l'énergie. L'objet du concept est de mettre au défi les ingénieurs et les scientifiques d'EACL de mettre au point un tel modèle et de concentrer les efforts de R et D à long terme pour appuyer cette mise au point. Si le type de réacteur CANDU X peut ne

jamais être construit en tant que tel, les retombées de la R et D à l'appui bénéficieraient à la mise au point évolutive du réacteur CANDU. Cette démarche a déjà donné des avantages potentiels.

Le concept du modèle CANDU X actuel est fondé sur l'utilisation d'un caloporteur à eau surcritique. Un certain nombre de centrales thermiques classiques modernes utilisent un tel caloporteur et des études récentes au Japon et en Russie indiquent que les réacteurs à eau ordinaire refroidis par eau surcritique sont faisables en extrapolant certaines caractéristiques de la technologie de la cuve sous pression actuelle. La conception modulaire du réacteur CANDU X, avec tubes de force à la place d'une cuve sous pression, devrait présenter un avantage à cet égard.

4.7.1 Étude conceptuelle du CANDU X actuel

La toute dernière étude conceptuelle du réacteur CANDU X, décrite par Bushby et autres [1], est fondée sur un agencement qui utilise la circulation naturelle du caloporteur primaire plutôt qu'un écoulement pompé[6]. Les avantages de ce modèle sont l'absence de pompes dans le circuit primaire, ce qui réduit les dépenses d'investissement et les coûts d'exploitation, et le perfectionnement de la sûreté passive.

4.7.2 Études analytiques du refroidissement par eau surcritique à circulation naturelle du réacteur CANDU X

EACL a mis au point un modèle analytique pour prévoir le comportement thermohydraulique d'un réacteur CANDU X refroidi par eau surcritique à circulation naturelle [1]. Les résultats préliminaires d'analyses avec ce modèle indiquent que, tandis que les puissances de canal semblables à celles des réacteurs CANDU actuels devraient être réalisables avec refroidissement par eau surcritique à convection naturelle, il peut être nécessaire d'apporter certaines modifications à la grappe de combustible et il peut y avoir certaines contraintes sur les conditions d'exploitation.

Comme on l'a vu dans le rapport du Comité de 1997, les hautes températures et pressions du caloporteur à eau surcritique nécessitent un nouveau type de canal de combustible composite, le canal CANTHERM. Dans ce modèle, il n'y a pas de tube de cuve et le tube de force est maintenu à une température proche de celle du modérateur par isolation interne.

En outre, dans son rapport de 1997, le Comité a mis l'accent sur la nécessité de mettre au point des modèles efficaces pour assurer une étanchéité adéquate entre le canal de combustible et son prolongement et entre le canal de combustible et la machine de manutention dans les conditions plus rigoureuses de pression et de température du modèle CANDU X refroidi par eau surcritique. EACL a mis au point un nouveau type de «joint d'alésage» pour l'étanchéité du canal de combustible, qui devrait réduire la probabilité de fuite, simplifier la machine de manutention du

---

[6] L'écoulement à circulation naturelle a été utilisé dans certains petits réacteurs à eau bouillante des É.-U. dans les années 50 en tirant profit de la grande différence de masse volumique entre l'eau à l'entrée du cœur et le mélange eau-vapeur à la sortie du cœur. L'écoulement à circulation naturelle est également utilisé dans les réacteurs de recherche SLOWPOKE à faible puissance d'EACL.

combustible et augmenter les vitesses de rechargement du combustible. Un modèle de travail a été produit pour démontrer le principe du joint d'alésage.

4.7.3 Ingénierie de la centrale

Des travaux de R et D considérables, ainsi qu'un effort de conception seront nécessaires pour assurer que l'objectif de réduction des dépenses d'investissement unitaires est atteint, particulièrement en prenant en compte l'augmentation importante de pression par rapport aux valeurs actuelles. Des efforts continus seront nécessaires pour améliorer la constructibilité de la centrale. En plus de la mise au point du type de générateur de vapeur horizontal et des machines de manutention du combustible appropriées aux conditions du réacteur CANDU X, on doit aborder les questions de commande de la centrale dans des conditions de pression surcritique, y compris les méthodes de démarrage et d'arrêt. En outre, des travaux seront nécessaires pour adapter ou développer les codes de calcul existants pour l'analyse de sûreté de ces modèles et pour entreprendre des études sur des scénarios d'accident dans les conditions de l'eau surcritique.

4.7.4 Conclusions

Le Comité est très impressionné par les progrès réalisés par EACL sur le réacteur CANDU X refroidi par eau surcritique et a le plaisir de noter qu'une fonction essentielle du concept CANDU X, soit de créer des retombées qui peuvent être incorporées dans les modèles CANDU évolutifs, commence déjà à porter fruit. Le type de joint d'alésage, qui pourrait réduire les coûts et améliorer les performances dans les modèles CANDU classiques, est déjà au centre d'un projet d'ingénierie.

4.7.5 Recommandations

Recommandation 1

En prenant en compte les retombées potentielles du programme CANDU X, ainsi que le défi continu qu'il représente pour les chercheurs et les ingénieurs, le Comité recommande qu'EACL envisage d'augmenter de façon importante le budget pour le concept CANDU X.

4.7.6 Bibliographie

1. S.J. Bushby, G.R. Dimmick, R.B. Duffey, N. Spinks et D.J. Wren, *Conceptual Design for a Supercritical-Water Cooled CANDU*, juin 1999.

CHAPITRE 5 : CENTRE CANADIEN DE NEUTRONS

5.1 INTRODUCTION

Depuis sa création, le Comité milite en faveur d'un nouveau réacteur de recherche pour EACL qui remplacera le réacteur NRU vieillissant. En 1998, le Comité a consacré des efforts considérables en faveur du Centre canadien de neutrons (CCN), fondé sur une variation de la technologie du réacteur MAPLE d'EACL, pour satisfaire les besoins :

- d'EACL, en tant que fournisseur de réacteurs, relativement à un réacteur de recherche qui permettra d'appuyer et de mettre au point à l'avenir le réacteur CANDU; et
- du Canada, en tant qu'économie industrielle avancée, relativement à une installation de faisceaux de neutrons pour la recherche fondamentale et appliquée sur les matériaux.

Dans son rapport de 1998, le Comité a présenté un examen détaillé des questions relatives au CCN et a publié un rapport spécial, en octobre 1998, intitulé *L'importance du Centre canadien de neutrons pour le soutien et l'expansion future des réacteurs CANDU*. Les membres du Comité ont également assisté à un atelier national sur la diffusion des neutrons à Ottawa en novembre 1998, qui mettait l'accent sur l'importance du CCN en tant qu'outil de recherche sur les matériaux.

Ce n'était là que quelques-unes des activités qui ont permis de réaliser la Proposition et le Sommaire du CCN. Maintenant que ces documents ont été réalisés, présentés au gouvernement fédéral et distribués à d'autres parties intéressées, le Comité a très peu de choses à ajouter à ses prises de position sur le sujet. Par conséquent, on n'en donne ici qu'un bref état d'avancement et qu'une évaluation sommaire.

5.2 ÉTAT D'AVANCEMENT ACTUEL

5.2.1 Activités récentes

Comme on l'a déjà noté, l'événement principal de l'année à été la réalisation de la Proposition du CCN et de son Sommaire par le CNRC et EACL, en mai 1999. Le Comité a le plaisir de noter que son rapport d'octobre 1998 susmentionné sur l'importance du CCN pour l'appui de la technologie CANDU a été annexé à la Proposition. Le Comité a contribué à la Proposition en fournissant à EACL une révision détaillée. Les membres du Comité ont également envoyé des lettres de soutien au CCN aux ministres fédéraux des Ressources naturelles et de l'Industrie.

Comme l'indique le Comité dans son rapport de 1998, le CNRC et EACL ont formé un comité directeur de haut niveau pour assurer l'orientation et la direction de la campagne de financement du CCN. Le Comité directeur, composé de représentants cadres du CNRC, d'EACL, du CRSNG et du groupe consultatif indépendant, a élaboré le Plan de communications du CCN pour présenter le CCN à un large auditoire au Canada.

Depuis que le rapport du Comité de 1998 a été publié, des mesures fondées sur le Plan de communications ont mis l'accent sur la nécessité du CCN auprès des ministres et ministères fédéraux et provinciaux, des universités, des industries et des politiciens locaux. L'importance du CCN en tant qu'outil de recherche sur les matériaux a été publicisée dans des reportages et éditoriaux des journaux. Des exposés sur le CCN ont été présentés à des conférences scientifiques et industrielles.

Ces activités ont suscité des déclarations fermes de soutien provenant d'universités, de chefs d'entreprises et de politiciens fédéraux, provinciaux et municipaux.

5.2.2 Questions politiques du gouvernement fédéral

La position du gouvernement fédéral vis-à-vis de la science et de la technologie est devenue bien plus positive récemment. Si l'on se fonde sur les déclarations du premier ministre et des principaux membres du cabinet, et sur certaines mesures concrètes, le gouvernement reconnaît que l'avenir de l'économie et de la structure sociale canadiennes dépendent largement du succès du Canada à s'adapter à une économie globale de plus en plus fondée sur les connaissances plutôt que sur les ressources. Des preuves de cette reconnaissance sont une affectation de plus de 1,8 milliard de dollars, dans le budget de février 1999, au domaine de la science et de la technologie et l'annonce du financement du Centre canadien du rayonnement synchrotron à l'université de la Saskatchewan, le plus gros investissement individuel dans l'infrastructure de R et D au cours des 30 dernières années.

En outre, les ministères du gouvernement fédéral intéressés reconnaissent de plus en plus l'importance de l'énergie nucléaire qui permet d'éviter les émissions de GES et d'aider le Canada à tenir ses engagements du Protocole de Kyoto (voir les détails dans le chapitre 3 du présent rapport). On devrait ainsi reconnaître de plus en plus la nécessité de s'assurer qu'EACL continue à commercialiser avec succès le réacteur CANDU, ce qui ne sera pas possible si l'on ne remplace pas le réacteur NRU par le CCN.

Un ouvrage récent de Lester Thurow, professeur réputé de gestion et d'économie au *Massachusetts Institute of Technology*, établit les nouvelles règles de succès dans le monde fondé sur les connaissances [1]. La règle numéro sept est la suivante : «Une solide économie fondée sur les connaissances nécessite de gros investissements publics dans l'éducation, les infrastructures et la recherche et développement.» Le financement du CCN par le gouvernement fédéral constituerait un investissement important dans l'infrastructure de R et D pour permettre d'assurer le succès continu de l'économie canadienne.

Par conséquent, le climat semble être favorable au financement du CCN. Toutefois, le Comité reconnaît que le gouvernement fédéral reçoit de nombreuses demandes concurrentes de financement et que des efforts considérables seront nécessaires pour bien faire comprendre les avantages du CCN pour le Canada et pour obtenir l'engagement du gouvernement fédéral dès que possible.

5.2.3 Questions de conception et d'exploitation

L'expérience acquise dans la conception et la construction des réacteurs MAPLE, Hanaro en Corée et RIMM aux LCR, et dans la rédaction de la soumission relative à un réacteur de recherche MAPLE pour le compte de l'*Australian Nuclear Science and Technology Organization* (ANSTO), a permis d'apporter des modifications bénéfiques à la conception du CCN.

L'expérience acquise avec les RIMM a permis de déterminer que l'on pouvait réduire les coûts de construction en déplaçant le CCN d'un endroit à l'intérieur de la zone active des LCR à un nouvel endroit, adjacent à l'emplacement actuel, mais à l'extérieur de la zone active. Avant que le réacteur ne diverge, on prolongerait la zone active pour qu'elle englobe le CCN. Le nouvel endroit peut également présenter l'avantage de faciliter l'accès aux chercheurs qui utilisent les installations de faisceaux de neutrons. On évalue actuellement les coûts et les avantages d'une telle démarche.

Grâce à l'expérience acquise avec la soumission ANSTO, EACL a élaboré des spécifications améliorées relativement à la source froide du CCN, elle a optimisé le plan de l'installation et à retenu des sources plus concurrentielles pour certains composants.

Le Comité a évalué les coûts d'exploitation des installations de faisceaux de neutrons, donnés dans la soumission, et les a trouvés raisonnables, particulièrement en ce qui a trait à l'ajout d'une source de neutrons froids. L'expérience acquise avec un réacteur de recherche japonais a permis de démontrer que les coûts pour les utilisateurs et les coûts associés étaient multipliés par dix après qu'une source froide ait été installée.

5.2.4 Questions de direction

La Proposition n'entre pas dans les détails sur la direction du CCN, si ce n'est qu'elle préconise une structure de gestion possible comprenant une autorité de gestion avec des directorats distincts pour le réacteur, les installations CANDU et le Laboratoire de faisceaux de neutrons.

Un défi primordial pour EACL et le CNRC est d'établir une méthode viable de direction qui répond aux préoccupations stratégiques du gouvernement fédéral, qui satisfait les besoins d'EACL relativement à la R et D CANDU ainsi que les besoins des chercheurs individuels qui utilisent les installations de faisceaux de neutrons. En outre, la CCEA doit être convaincue que la conception et le fonctionnement du CCN sont gérés de façon appropriée pour s'assurer que les exigences d'autorisation sont satisfaites et que la sûreté est assurée.

Deux des questions qui doivent être réglées au sujet du modèle de direction sont :

- le moyen de gérer les exigences complexes d'ordonnancement expérimental, et
- les dispositions pour financer la recherche par faisceaux de neutrons.

RNCan a été appelé à élaborer un modèle de direction pour le CCN qui satisfera ces besoins. Une possibilité envisagée est d'établir une entité légale distincte d'EACL et de RNCan pour recevoir et

administrer le financement. Un modèle de direction convenable peut être indispensable pour obtenir l'approbation de la proposition du CCN par le gouvernement fédéral.

5.2.5 Vide neutronique

Dans ses rapports précédents, le Comité a exprimé ses inquiétudes relativement à un «vide neutronique», période entre l'arrêt du réacteur NRU et le démarrage du CCN pendant laquelle le Canada et le programme CANDU en particulier n'auraient pas accès à un réacteur de recherche national.

5.3 CONCLUSIONS

Comme le déclare le lauréat du prix Nobel, Bertram Brockhouse, dans le Sommaire de la Proposition du CCN «Le Centre canadien de neutrons offre des possibilités sans précédent pour l'avancement de la recherche sur les matériaux au Canada et est indispensable pour continuer à assurer le succès du programme électronucléaire du Canada.» Le Comité appuie fortement cette déclaration, qui est essentiellement le même message exprimé à maintes reprises dans le passé par le Comité.

En outre, le Comité met l'accent sur l'urgence d'un engagement ferme de la part du gouvernement fédéral vis-à-vis du CCN. Le Comité estime qu'il est important de faire cet investissement stratégique de façon opportune afin de conserver les talents scientifiques et de poursuivre la recherche de pointe.

5.4 RECOMMANDATIONS

Recommandation 1

Le Comité recommande qu'EACL continue à faire pression auprès du gouvernement fédéral pour qu'il s'engage le plus tôt possible vis-à-vis du CCN afin de réduire au minimum le vide neutronique.

Recommandation 2

Étant donné qu'un modèle de direction acceptable pour tous les intervenants sera nécessaire, le Comité recommande qu'EACL accorde une haute priorité à établir une collaboration étroite avec RNCan, le CNRC et d'autres organismes pour élaborer le plus tôt possible un plan de direction qui satisfait les besoins essentiels des intéressés.

5.5 BIBLIOGRAPHIE

1. L.C. Thurow, *Building Wealth : New Rules for Individuals, Companies and Nations in a Knowledge-Based Economy*, Harper Business, 1999.

CHAPITRE 6 : PROGRAMME DE RADIOBIOLOGIE ET RADIOPROTECTION

6.1 INTRODUCTION

Dans ses rapports précédents, le Comité a mis l'accent sur l'importance de la recherche relativement aux effets du rayonnement ionisant sur l'écosystème et l'environnement. Les résultats de ces études appuient l'industrie tant directement qu'indirectement. Les contraintes d'origine biologique sont directement utilisées par EACL, les compagnies d'électricité et par la CCEA pour définir les limites d'ingénierie et de conception acceptables des conditions d'exploitation sûres pour la protection des travailleurs, du public et de l'environnement contre les effets néfastes du rayonnement ionisant. Les coûts associés à la conception et au fonctionnement des centrales nucléaires dans ces limites ont des conséquences sur la viabilité économique de l'option nucléaire à long terme. Si l'énergie nucléaire continue à présenter une option concurrentielle au point de vue économique, en vertu du cadre réglementaire prudent actuel, la conception et la réglementation dépassant la nécessité biologique augmentent les coûts, qui doivent être assumés finalement par le consommateur. Par conséquent, EACL, en tant que fournisseur des réacteurs CANDU, a besoin d'une source continue d'informations radiobiologiques et de compétences internes pour analyser de façon critique ces données. La CCEA et les autres organismes gouvernementaux ont besoin de preuves et d'avis radiobiologiques afin d'établir des normes réglementaires réalisables.

6.2 PRÉOCCUPATIONS DU PUBLIC

Les préoccupations du public sur la sûreté des centrales nucléaires ne peuvent être apaisées de façon responsable que par une compréhension fondée sur les faits des effets des rayonnements. Si la science seule ne suffira pas à contrer les opinions publiques négatives sur l'énergie nucléaire, il est essentiel que les promoteurs de la technologie fondent leur participation sur l'information précise relative aux effets biologiques et environnementaux, entre autres, du cycle de vie d'une centrale nucléaire. Ce besoin n'est pas tant suscité par les exigences internes d'EACL que par les besoins de politique publique et d'une planification à long terme.

En outre, on note que la radiobiologie a de nombreuses interconnexions fécondes avec d'autres secteurs des sciences de la santé aussi variées que l'oncologie, la toxicologie, la biologie moléculaire et la médecine aérospatiale. Donc, la poursuite d'un programme sérieux de radiobiologie canadien sera bénéfique à des secteurs de développement qui s'étendent bien au-delà des besoins immédiats d'un programme électronucléaire. Étant donné que les avantages de la recherche radiobiologique sont ambitieux, il est raisonnable de s'attendre à ce que tous les bénéficiaires contribuent collectivement à l'appuyer. Toutefois, on ne pourrait pas s'attendre à ce qu'EACL seule continue à financer le programme complet de radiobiologie et radioprotection.

Les préoccupations du public et les besoins de l'industrie nucléaire tournent autour de la même question, à savoir quels sont les effets des faibles doses de rayonnement. L'hypothèse prudente qui sous-tend le principe accepté internationalement pour le règlement sur la protection contre les

rayonnements est que toutes les radioexpositions sont nocives en fonction de la dose reçue, hypothèse qui a été acceptée par le public. Cet effet de dose réside dans la plage de dose élevée dans laquelle il est possible d'effectuer des expériences valables au point de vue statistique. Toutefois, aux très faibles doses, auxquelles les travailleurs de l'énergie nucléaire ou le public peuvent être fréquemment exposés, l'effet s'il y en a un est moins certain. Il en est ainsi parce que il n'a pas été possible d'effectuer des analyses épidémiologiques valables au point de vue statistique pour déceler la faible fréquence de déformations congénitales ou de cancers provoqués par les rayonnements du fait qu'un certain nombre d'entre eux sont dus à des événements spontanés.

La preuve que les effets cellulaires du rayonnement sont dus aux dommages à l'ADN provenait de la recherche radiobiologique, tout comme les observations que la majeure partie des dommages, même à des doses élevées, est réparée plus rapidement. L'importance des dommages dus aux doses élevées submerge les mécanismes de réparation et empêche la réparation complète. Les dommages résiduels entraînent une modification du comportement des cellules et dans certains cas l'amorce d'un cancer. On ne sait pas si ceci se produit également avec une fréquence proportionnelle à de faibles doses étant donné que l'ampleur des réparations peut être supérieure ou même complète. Les nouvelles techniques en biologie moléculaire permettent de prendre en compte des expériences pour déterminer si les cellules réparent vraiment de façon fiable tous les dommages à la suite de faibles doses. Par conséquent, l'hypothèse selon laquelle il y a une dose seuil au-dessous de laquelle aucun effet important ne se produit est devenue vérifiable. Si l'hypothèse était confirmée, une certaine souplesse dans les limites de dose actuelles permettrait d'apporter des changements importants dans l'industrie, qui augmenteraient la compétitivité économique de l'énergie nucléaire et pourraient améliorer considérablement l'adhésion du public à l'énergie nucléaire. Le DOE des États-Unis propose de financer un programme important de recherche pour vérifier l'hypothèse seuil et on attend actuellement l'approbation du Congrès sur le financement.

6.3 FINANCEMENT DE LA RADIOBIOLOGIE

Le dilemme devant lequel EACL s'est trouvée relativement au service Radiobiologie et Radioprotection a été examiné dans le rapport du Comité de 1998. En bref, la réduction du financement de la recherche et développement par le gouvernement ainsi que le mandat de la Société de devenir fournisseur des réacteurs CANDU, plutôt que de continuer à jouer le rôle de Laboratoire nucléaire national, ont imposé des contraintes sur l'établissement des priorités, de sorte que l'appui financier minimum nécessaire pour assurer la survie d'un programme de biologie indépendant n'est plus disponible. Bien qu'EACL continue à avoir besoin des services de dosimétrie et d'études de radiobiologie et radioprotection pour son propre usage, le volume et la portée des travaux internes en radiobiologie ne sont pas suffisants pour continuer à intéresser les scientifiques et les technologues, ou pour utiliser à fond les avantages du Centre des sciences biologiques CANDU.

Le service Radiobiologie et Radioprotection n'est pas un cas particulier dans les programmes de R et D d'EACL : il constitue un exemple des aspects de la recherche nucléaire qui sont nécessaires pour appuyer l'élaboration de politiques nationales, la réglementation de l'industrie nucléaire, la

sécurité du public et la protection de l'environnement. Ainsi, ces disciplines devraient logiquement être financées indépendamment d'EACL et tenues responsables par des canaux qui sont également indépendants d'EACL. Ainsi, à l'exception des Services de dosimétrie, le Programme de radiobiologie et radioprotection se trouve dans une période de transition. On doit avoir une vision claire de ce qui va se passer à l'avenir. Ce programme aura besoin d'un appui provisoire jusqu'à ce que la vision soit acceptée et mise en oeuvre.

Au cours de 1999, les biologistes et le personnel d'EACL ont entrepris de sensibiliser les bénéficiaires, jusque-là silencieux, du Programme de radiobiologie et radioprotection aux besoins de changement. Il y a eu des discussions avec la CCEA et le Bureau de radioprotection de Santé Canada. Peut-être fortuitement, l'annonce du gouvernement dans le budget de 1999 de restructurer la recherche sur la santé sous les instituts canadiens de recherche en santé présente l'occasion d'une résolution dans laquelle la radiobiologie serait intégrée à l'un des instituts virtuels envisagés. Si tel était le cas, cela permettrait d'intégrer cet aspect important de la R et D d'EACL à la recherche biomédicale centrale des universités.

La situation du Programme de radiobiologie et radioprotection est quelque peu comparable à celle du Programme de sciences des matériaux qui a maintenant été transféré avec succès au CNRC après une période de transition de 3 ans. Ce qui est préoccupant relativement au programme de Radiobiologie et Radioprotection est que le mode et le moyen de transition ne sont pas entièrement précisés et que le financement provisoire n'a pas été encore trouvé.

6.4 CENTRE NATIONAL DES SCIENCES RADIOLOGIQUES

Pour EACL, l'avenir du Programme de radiobiologie et radioprotection est lié à sa restructuration en tant que «Centre national des sciences radiologiques», un institut indépendant rattaché à une université, à EACL ou à un ministère, et financé par ses clients et ses bénéficiaires. Le Centre national des sciences radiologiques serait principalement rattaché aux LCR de façon à profiter des installations et à répondre aux exigences d'EACL, mais il aurait des connexions nationales et internationales. Cette orientation scientifique serait supervisée par un comité représentant les actionnaires et ses fonctions principales seraient :

- d'effectuer des travaux de R et D en radiobiologie et radioprotection;
- d'offrir les services de dosimétrie à EACL et à d'autres clients;
- d'offrir des services de R et D et des services commerciaux aux clients;
- d'informer et de conseiller le gouvernement et l'industrie; et
- de participer aux organismes de normalisation nationaux et internationaux.

On prévoit qu'EACL continuera à appuyer les Services de dosimétrie et la R et D de Radiobiologie et Radioprotection pour les besoins associés aux réacteurs CANDU.

À l'extérieur d'EACL on pense que le Canada, pour plusieurs raisons, a vraiment besoin de conserver ses infrastructures de radiobiologie.

6.5 CONCLUSIONS

D'un avis unanime, l'expérience en radiobiologie qu'EACL a acquise pendant de si nombreuses années constitue une ressource nationale et devrait continuer à être financée à l'avenir par ses clients et bénéficiaires.

Le Comité fait l'éloge du personnel scientifique et technique d'EACL pour la créativité dont il a fait preuve au cours de cette période difficile. Les biologistes ont eu du succès dans plusieurs concours de financement extérieur pour appuyer la recherche en cours. Ceci démontre que le groupe jouit d'une crédibilité extérieure et que les sujets sur lesquels il se concentre ont une importance nationale et internationale. Le Comité estime que le succès de ces initiatives devrait être la preuve de l'importance et de la crédibilité du programme et ne devrait pas fermer les yeux du gouvernement et d'autres bénéficiaires éventuels du programme sur l'importance d'assurer un financement transitoire stable pour le Programme de radiobiologie et radioprotection au cours des cinq prochaines années.

6.6 RECOMMANDATIONS

Recommandation 1

Le Comité recommande qu'EACL continue à appuyer la transition du Programme de radiobiologie et radioprotection jusqu'à ce qu'il soit stabilisé. À court terme, on devrait sensibiliser les clients et bénéficiaires futurs à l'importance d'un concept de Centre national des sciences radiologiques et à la nécessité d'appuyer le programme pendant la période de transition. Toutes les possibilités raisonnables de financement extérieur devraient être envisagées.

Recommandation 2

Le Comité recommande qu'EACL suive de près l'évolution relative aux instituts canadiens de recherche en santé et participe, dans la mesure du possible, à la mise sur pied des instituts virtuels pour s'assurer qu'on ne perd aucune occasion d'associer le Programme de radiobiologie et radioprotection aux intérêts associés de la recherche en santé nationale.

CHAPITRE 7 : RELATIONS AVEC LES UNIVERSITÉS

7.1 INTRODUCTION

Au cours des huit années pendant lesquelles il a supervisé les activités de R et D d'EACL, le Comité a reconnu l'importance de liens avec les universités. Probablement le meilleur exemple du succès de ces liens réside dans la forte interaction qui existe entre les industries de pointe et les universités. En effet, l'appui de l'industrie à l'enseignement et à la recherche universitaire s'est traduit par d'importants avantages pour les deux parties.

Quatre avantages principaux découlent des liens d'EACL avec les universités :

- EACL a entretenu des relations avec les jeunes gens, qui constituent le réservoir de talents en développement pour le recrutement et qui jouent également un rôle important en relations publiques.
- Les chercheurs à Chalk River se tiennent à la page des progrès extérieurs dans les aspects fondamentaux de la science et de l'ingénierie. Ceci permet à EACL de maintenir sa position en tant qu'organisme principal de R et D au Canada et à l'étranger, une situation qui peut être importante pour les clients éventuels.
- Les chercheurs universitaires dans les sujets associés au nucléaire sont capables d'apporter des solutions différentes, mais complémentaires aux problèmes techniques.
- L'étude de problèmes qu'EACL ne peut pas elle-même effectuer parce qu'elle manque de ressources peut être confiée sous contrat aux laboratoires universitaires.

Ces avantages, particulièrement les deux derniers, ont perdu de leur importance au cours des dernières années. Ceci a été occasionné par plusieurs facteurs, dont tous ont eu pour effet de mettre davantage l'accent sur l'«ingénierie» et «la mise au point» par rapport à la «science» et à la «recherche». Le facteur le plus important de tous a été la réduction d'environ 50 % de la subvention parlementaire à EACL. Ceci a nécessité la fermeture de l'installation du Cyclotron supraconducteur à accélérateur tandem (TASCC) et a diminué l'importance de l'aspect «Laboratoire national» des activités d'EACL. Un deuxième facteur important a porté sur la restructuration du Groupe des propriétaires de centrales CANDU (GPC) qui a réduit considérablement son financement de la R et D pour se concentrer sur l'amélioration des performances de la centrale CANDU. Ceci a entraîné une réduction de la quantité de R et D des GPC effectuée à EACL.

Un effet indirect de ces réductions et changements a été que le nombre d'étudiants de premier, de deuxième et de troisième cycles ainsi que les boursiers de recherche postdoctorale et professeurs, qui travaillaient à EACL a diminué avec le temps. Par conséquent, il semble opportun que le Comité fasse le point de la situation en 1999 et examine ce que l'on peut et doit faire pour améliorer les relations d'EACL avec les universités canadiennes afin de profiter des avantages potentiels.

7.2 CHAIRES D'UNIVERSITÉ

EACL a l'habitude depuis longtemps d'appuyer des postes de recherche principaux dans les universités canadiennes, les premiers exemples étant des nominations en science des matériaux à l'université de Western Ontario au cours des années 80, quand les activités en science des matériaux d'EACL ont été réduites et que le personnel de Chalk River y a été muté. Plus récemment, la chaire Bertram Brockhouse a été établie à l'université McMaster en 1998 après qu'EACL ait fait un versement unique en 1996.

De telles nominations fournissent à EACL les liens avec les sciences fondamentales susmentionnées et améliorent sa réputation auprès de la communauté universitaire. Par exemple, à sa réunion de décembre 1999, le Comité a entendu un exposé du titulaire de la chaire Brockhouse, le professeur Bruce Gaulin, qui a décrit ses activités de recherche dans les matériaux avancés. Il est clair que ces activités sont à l'avant-garde de la recherche dans la physique de la matière condensée et constitue un excellent exemple de la synergie entre le groupe du CNRC qui exploite les installations de faisceaux de neutrons à Chalk River et les universités. La mise en service du CCN sera essentielle pour ces activités et d'autres à l'avenir. De même, en cédant une grande quantité d'eau lourde au projet de l'Observatoire de neutrinos à Sudbury, EACL donne un sérieux appui à la communauté de la science fondamentale.

7.2.1 Chaires de recherche industrielle du CRSNG

Un aspect important de l'appui aux chaires d'université est que l'on peut souvent obtenir des financements équivalents provenant des partenaires de l'industrie et, par l'intermédiaire du CRSNG, du gouvernement fédéral. En général, quand EACL contribue à une chaire de recherche industrielle CRSNG, un ou plusieurs partenaires industriels versent l'équivalent et le CRSNG met l'équivalent du total. En fournissant les capitaux de lancement et autre soutien approprié, EACL est par conséquent capable de favoriser le développement de certains sujets de recherche et spécialisations. Ainsi, des types d'expérience, qui sinon feraient défaut, peuvent être favorisés. L'engagement initial vis-à-vis d'une chaire de recherche industrielle est pris pour cinq ans et, pendant cette période, le salaire du titulaire de la chaire est graduellement pris en charge par l'université. Ceci signifie que l'université s'engage à ce que la chaire devienne permanente. Une fois que le titulaire est nommé à une chaire de recherche industrielle et que l'infrastructure et l'équipement sont mis en place, les étudiants diplômés, les boursiers du niveau postdoctoral, les professeurs invités, etc., parviennent à participer à la recherche du groupe.

Une chaire de recherche industrielle peut être renouvelée pour cinq ans supplémentaires, mais les règles de financement du CRSNG pour le deuxième mandat sont différentes étant donné que seul le salaire du titulaire pris en charge progressivement par l'université peut être financé par cette subvention. Les activités de recherche sont alors subventionnées par un autre mécanisme du CRSNG comme une subvention de recherche à incidence industrielle, pour laquelle le titulaire doit faire une demande en concurrence avec d'autres demandeurs.

L'expérience qu'a acquise EACL avec les chaires de recherche industrielle (CRI) est résumée brièvement ci-après :

CRI en génie nucléaire, Université du Nouveau-Brunswick

Cette chaire a été établie en partenariat avec Énergie Nouveau-Brunswick en 1984, renouvelée en 1989 et close en 1991.

Ceci a été la première Chaire de recherche industrielle du CRSNG. Le titulaire, D. Meneley d'Ontario Hydro, a établi un laboratoire de rayonnement de faible intensité pour les études sur la tomographie à l'Université du Nouveau-Brunswick et a mis au point les techniques d'analyses et de modélisation pour les réacteurs nucléaires. Des cours ont été établis pour les étudiants de premier, de deuxième et de troisième cycles dans un programme à option nucléaire pour répondre aux besoins de recrutement d'Énergie Nouveau-Brunswick, et la faculté de l'université a participé au programme de formation des opérateurs à la centrale de Pointe Lepreau.
M. Meneley a démissionné en 1991 pour devenir ingénieur en chef d'EACL à Sheridan Park.

CRI en génie nucléaire, Université du Nouveau-Brunswick

Cette chaire a été établie en partenariat avec Énergie Nouveau-Brunswick en 1992 et renouvelée en 1997.

Cette chaire a succédé à la première Chaire de recherche industrielle, mais a été établie, selon les règles du CRSNG, comme une entreprise entièrement nouvelle. Le bénéficiaire, D. H. Lister de Chalk River, a construit un laboratoire de rayonnement de moyenne intensité dans lequel on a installé des boucles et des autoclaves à haute température pour étudier les problèmes de corrosion et de transport de masse dans les circuits de refroidissement du réacteur. Des circuits à basse température ont également été construits pour étudier les aspects de transport de masse de l'encrassement des échangeurs de chaleur. Des cours de premier, de deuxième et de troisième cycles dans l'option nucléaire ont été mis sur pied, et ils contribuent à la formation des opérateurs de Pointe Lepreau et d'autres centrales nucléaires canadiennes.

CRI en génie nucléaire, université de Toronto

Cette chaire a été établie en partenariat avec Ontario Hydro en 1989, renouvelée en 1994 et close en 1999.

B. Cox de Chalk River a fait bénéficier de son expérience dans la corrosion et l'hydruration du zirconium et de ses alliages à l'université de Toronto où le Centre du génie nucléaire a été établi. Le programme de recherche a permis d'élucider davantage les mécanismes de corrosion de l'alliage de zirconium en utilisant les installations à autoclaves à haute température et les techniques d'analyse de surface. Un aspect important du programme comprenait l'interaction avec le réacteur SLOWPOKE de l'université de Toronto, où l'on a pu étudier les phénomènes des dégâts causés par l'irradiation. En fait, en tant que président du Centre du génie nucléaire, M. Cox s'est chargé de la demande auprès du CRSNG relativement au financement d'un cœur de rechange

pour le SLOWPOKE en 1996. Le Centre du génie nucléaire et le réacteur SLOWPOKE ont été les éléments essentiels d'un programme du premier cycle à option en génie nucléaire et dans la formation d'étudiants aux cycles supérieurs et de chercheurs postdoctoraux. Toutefois, en 1998 l'aide pour la remise en état du réacteur avait baissé et en 1999 le programme à option pour étudiants du premier cycle avait été supprimé. M. Cox a pris sa retraite et est devenu professeur émérite en 1999, mais reste président du Centre du génie nucléaire. Il occupe également un poste de chercheur émérite à Chalk River. Ses activités de recherche se poursuivent à l'université, mais se termineront quand ses derniers étudiants de recherche obtiendront leur diplôme.

CRI en conception technique avancée, université de la Saskatchewan

Cette chaire a été proposée par EACL en 1995.

Cette Chaire de recherche industrielle a été conçue comme complément aux activités de conception actuelles et planifiées d'EACL en Saskatchewan et visait à établir des plans plus efficaces pour la construction des composants principaux des réacteurs CANDU avec les avantages supplémentaires de réduction des coûts et d'amélioration du calendrier des travaux. Cependant, les activités d'EACL en Saskatchewan ont maintenant été restreintes et la Chaire de recherche industrielle ne s'est jamais matérialisée.

CRI en mécanique appliquée, École Polytechnique

Cette chaire était en cours de négociation en 1999 avec B&W Canada, partenaire industriel d'EACL, et elle a été approuvée par le CRSNG en décembre 1999.

Quand cette Chaire de recherche industrielle sera établie, un scientifique de Chalk River sera nommé comme bénéficiaire. Elle permettra d'acquérir de l'expérience dans le secteur de la vibration due à l'écoulement, qui peut être un phénomène limitant la vie utile des composants de réacteurs CANDU comme les échangeurs de chaleur et les générateurs de vapeur. La recherche devrait assurer un appui scientifique sous-jacent pour les travaux plus appliqués effectués à EACL. La nomination devrait renforcer la composante nucléaire des programmes de génie du premier cycle à l'École Polytechnique et déboucher sur la formation ultérieure des étudiants aux cycles supérieurs et des chercheurs postdoctoraux dans un secteur du génie nucléaire. Un lien étroit devrait se nouer avec le Programme de génie nucléaire et le fonctionnement du réacteur SLOWPOKE à l'École Polytechnique.

7.2.2 Chaires de génie nucléaire

Les interactions avec les universités étrangères, comprenant l'établissement de chaires de génie nucléaire, sont, et continuent d'être, une activité importante pour EACL.

Actuellement, deux chaires se classent dans cette catégorie :

Chaire de génie nucléaire, Institut de génie avancé à Yongin, Corée

Cette chaire a été établie en 1993 avec comme partenaire l'Institut de génie avancé. La participation d'EACL est négociée tous les ans.

L'objectif du titulaire, M. J. MacBeth est de faciliter le transfert de technologie entre EACL et les organismes coréens appropriés relativement au réacteur CANDU, comme le système de conception et de dessin assisté par ordinateur (CDAO), les commandes, la construction et l'analyse de sûreté. Un autre objectif est de nouer des liens de collaboration avec les organismes industriels coréens importants.

Chaire de génie nucléaire, université Chulalongkorn à Bangkok, Thaïlande

Cette chaire a été établie en 1995 avec comme partenaires l'université Chulalongkorn, l'Autorité de production d'électricité de la Thaïlande et l'Agence canadienne de développement industriel.

La chaire est un élément essentiel de l'appui d'EACL pour l'initiative thaï de prolonger et d'améliorer l'enseignement universitaire en génie nucléaire, de planifier et de mettre en œuvre les programmes de perfectionnement professionnel pour l'industrie et d'assurer l'éducation du public en ce qui a trait à l'énergie nucléaire. Le titulaire, G. Bereznai, prend également une part active à nouer des liens de collaboration avec les universités en Asie du Sud-Est.

7.2.3 Résumé

En résumé, les chaires universitaires canadiennes d'EACL comprennent actuellement une Chaire de recherche industrielle en cours à l'Université du Nouveau-Brunswick et une qui doit être instaurée à l'École Polytechnique. Les liens de collaboration entre EACL et les universités apportent des avantages mutuels et renforcent la science qui présente un intérêt pour les deux parties.

7.3 CONTRATS DE RECHERCHE AVEC LES UNIVERSITÉS

EACL passe des contrats de recherche importants avec les universités.

Sur les vingt-huit contrats passés en 1997-1998, cinq ont été exécutés à l'étranger : trois à la *Keele University* (Royaume-Uni), un à l'*University of Minnesota* (États-Unis) et un à l'*University of Liverpool* (Royaume-Uni). Les contrats canadiens ont été répartis comme suit : université Carleton (4), École Polytechnique (4), université du Manitoba (1), université MacMaster (3), Université de Montréal (1), Université du Nouveau-Brunswick (3), Université d'Ottawa (2), Université de Sherbrooke (1), université de Toronto (2) et université de Western Ontario (2).

De nombreux étudiants diplômés aux niveaux supérieurs ont également préparé des mémoires de maîtrise et des thèses de doctorat sur des sujets associés au nucléaire. Un grand nombre de ces

étudiants a trouvé un emploi par la suite dans des firmes ou agences qui ont à faire à l'énergie nucléaire.

Les contrats sont non seulement un moyen rentable de faire de la recherche et de donner des renseignements importants à EACL, ils jouent également un rôle essentiel dans l'amélioration des connaissances générales de la technologie CANDU et de l'importance de l'énergie nucléaire dans la production d'électricité et autres applications. Par conséquent, les contractants universitaires devraient être considérés comme des partenaires et non comme des concurrents, dans l'atteinte des objectifs scientifiques et techniques particuliers.

Le Comité approuve les contrats de recherche avec les université et estime que, eu égard aux nombreux avantages pour EACL qui découlent de ces contrats, l'on doit poursuivre la politique actuelle visant à chercher l'aide d'experts universitaires appropriés.

7.4 ÉTUDIANTS AUX LABORATOIRES D'EACL

EACL a l'habitude depuis longtemps d'accueillir des étudiants du premier, du deuxième et du troisième cycles aux laboratoires de Whiteshell et de Chalk River. En plus des travaux utiles qu'ils exécutaient (et de la formation qu'ils recevaient), leur participation aux programmes d'EACL a également constitué un élément important des relations publiques, puisqu'elle a servi à mieux comprendre les aspects scientifiques et techniques de l'énergie nucléaire. Les étudiants ont donc joué un rôle dans la promotion de l'acceptation par le public de la production d'énergie nucléaire en tant qu'option de politique.

Toutefois, ces dernières années on a connu une baisse des emplois d'étudiants par EACL. Par exemple, à l'été 1991 (l'année que le Comité a entrepris ses délibérations) 79 étudiants occupant un emploi d'été ont été engagés aux LCR, mais, en 1999, il n'y avait plus que 45 étudiants et stagiaires.

En raison de l'importance pour les relations publiques de maintenir des liens avec la communauté universitaire et des avantages importants qu'ont pour le recrutement les emplois d'été et autres (p. ex., programme coopératif) à EACL, le Comité recommande que ces activités se poursuivent au moins à leur niveau actuel.

7.5 SITUATION CANADIENNE DE L'ENSEIGNEMENT ET DE LA FORMATION EN GÉNIE NUCLÉAIRE

S'il n'existe pas au Canada de département offrant des diplômes de premier cycle en génie nucléaire, des écoles d'ingénieurs classiques préparant à des diplômes en génie chimique, mécanique, etc., donnent des cours ou programmes à option fondés sur les sujets nucléaires. Quelques-uns de ces programmes ont mis l'accent sur les sujets de génie nucléaire traditionnels comme la physique du réacteur et la physique neutronique, la conception du cœur du réacteur, la thermohydraulique et la technologie du caloporteur et ont, par conséquent, offert une formation des plus intenses en génie nucléaire. D'autres ont simplement ajouté un nombre de sujets relatifs au nucléaire comme la radiochimie pour donner une saveur aux matières principales classiques. Aux niveaux supérieurs, de nombreux étudiants diplômés ont continué à faire de la recherche relative à l'énergie nucléaire dans divers départements de génie du Canada.

Certains collèges et universités offrent leurs services à contrat à l'industrie pour former du personnel nucléaire et pour préparer leur documentation de formation. Il convient de noter ici que la CCEA impose des exigences rigoureuses pour la formation du personnel qui fait fonctionner les installations nucléaires. Pour satisfaire ces exigences, les compagnies d'électricité, Hydro-Québec et Énergie Nouveau-Brunswick, qui disposent d'installations de formation nucléaire limitées, ont eu recours aux services universitaires appropriés pour combler le vide, souvent dans les secteurs sous-jacents de la science et de l'ingénierie. En outre, les membres du personnel employés par la CCEA ont eu recours aux universités ou aux collèges, qui ne dépendent pas directement de l'industrie, pour satisfaire certains de leurs propres besoins en formation.

Il est intéressant de noter qu'aux cinq universités canadiennes qui ont fourni des données sur leurs programmes de génie nucléaire pour une étude administrée par l'Association nucléaire canadienne [1], le nombre d'étudiants de premier cycle et les diplômes de baccalauréat délivrés avec une option nucléaire sont restés à peu près les mêmes entre 1990 et 1998. Par contre, les étudiants de maîtrise et de doctorat et le nombre des diplômes délivrés à ces niveaux ont quelque peu baissé au cours de cette période, mais probablement pas en dehors de la variation statistique prévue. Le nombre de membres du personnel enseignant est demeuré également relativement constant.

Quant aux installations de recherche aux universités, la mise à l'arrêt récente du réacteur SLOWPOKE à l'université de Toronto aura des conséquences sur les programmes, en particulier en Ontario. Ailleurs, il reste toutefois cinq réacteurs dans des universités. Le réacteur SLOWPOKE à l'École Polytechnique de Montréal vient de recevoir un nouveau cœur, et le SLOWPOKE à l'université Dalhousie d'Halifax est actuellement remis en état. De plus, les réacteurs SLOWPOKE au Collège militaire royal de l'Ontario et à l'université de l'Alberta fonctionnent régulièrement selon les prescriptions et le plus gros réacteur-piscine de 5 MW à l'université McMaster de l'Ontario fonctionne parfaitement avec un nouveau plan de gestion. Bien que tous ces réacteurs ne participent pas à des programmes de génie nucléaire en soi (l'analyse par activation neutronique étant la fonction principale du SLOWPOKE de l'université Dalhousie, par

exemple), leurs fonctions d'exploitation, de recherche et d'enseignement portent toutes sur les aspects importants de la technologie nucléaire.

On doit noter également que les universités disposent de plusieurs installations pour la recherche en génie nucléaire en dehors des installations auxiliaires des réacteurs SLOWPOKE. En particulier, la chaire nucléaire à l'Université du Nouveau-Brunswick exploite le laboratoire de rayonnement de moyenne intensité avec des boucles et autoclaves à haute température pour les études du caloporteur du réacteur, tandis qu'une nouvelle chaire proposée à l'École Polytechnique permettra de mettre sur pied un laboratoire avec bancs d'essai pour étudier les vibrations produites par l'écoulement dans les composants du réacteur. On trouve également des départements de génie dans les universités du Canada qui disposent d'installations capables d'effectuer de la recherche dans le domaine du nucléaire ou même exclusivement consacrées à ce domaine. En général, de nombreux départements disposent de bancs thermohydrauliques et, en particulier, une installation de simulation du confinement dans le département de génie mécanique et aérospatial à l'université Carleton, construite pour simuler des conditions d'accident du SLOWPOKE, a été adaptée aux études générales du confinement.

Une question qui est de plus en plus d'actualité pour le Comité relativement à l'enseignement et à la formation dans le domaine du génie nucléaire est l'avantage de rédiger un livre de cours exhaustif sur la technologie CANDU. Si le réacteur CANDU est donné dans plusieurs textes comme un exemple de réacteur nucléaire refroidi par eau, aucun ouvrage ne donne une description complète de tous les aspects principaux du réacteur CANDU (par contre, nous renvoyons à la publication récente de D. Rozon intitulée *Introduction to Nuclear Reactor Kinetics*, Polytechnic-International Press, 1998, qui se concentre sur la physique du cœur du réacteur CANDU). Si un texte aussi exhaustif était à la disposition des universités, des instituts, des clients actuels et éventuels, l'enseignement des principes du réacteur CANDU et du transfert de la technologie CANDU serait bien plus facile. Un livre de cours sur le réacteur CANDU aiderait également le Centre des codes d'EACL à atteindre l'objectif de gestion de la propriété intellectuelle d'EACL, investi dans les codes de calcul, et à la propager de façon appropriée.

7.6 NOUVEAU RÔLE DES LABORATOIRES DE CHALK RIVER

Les modifications apportées au mandat d'EACL, qui passe du rôle de laboratoire nucléaire national à celui de fournisseur nucléaire, ont occasionné un changement dans la direction de la recherche à EACL. Le Conseil national de recherche gère actuellement le Programme neutronique pour la recherche sur les matériaux (PNRM), autrefois sous la direction d'EACL. Le PNRM comprend cinq installations expérimentales de faisceaux de neutrons au réacteur NRU, plus les services et le matériel de soutien (ainsi qu'environ 20 membres du personnel). L'existence du PNRM à l'intérieur de la communauté technique de Chalk River offre un lien continu important entre EACL et la science plus fondamentale effectuée par les chercheurs universitaires.

Il est symptomatique que les installations des faisceaux de neutrons au PNRM (spécialement la composante de diffraction des poudres du matériel DUALSPEC et la capacité d'analyse de

surface de la technique de réflexion) aient attiré une nouvelle génération de chercheurs à Chalk River, bien moins versée en technique de diffraction neutronique (ce ne sont pas tous des physiciens) et moins disposée à passer de longues périodes à l'installation. Un nouveau mécanisme de gestion a été mis en place pour régler les nouvelles dispositions d'exploitation, avec un plus grand nombre d'utilisateurs et beaucoup plus de données à analyser. On devrait tirer des leçons intéressantes du succès de cette entreprise pour l'utilisation du CCN envisagé par un groupe encore plus varié et bien plus nombreux de scientifiques.

Le programme PNRM comprend actuellement quelque 100 scientifiques et ingénieurs, qui exécutent ensemble environ 180 projets par an. Les universités du Canada (dont dix en Ontario en 1997) ont des projets en cours au PNRM. De nombreux clients en plus des nombreux utilisateurs d'EACL ont eu recours aux installations. Étant donné que le mode d'utilisation des universités et de l'industrie risque de continuer, il se peut que le nombre de participants change.

7.7 RECOMMANDATIONS

Recommandation 1

Le Comité recommande qu'EACL continue à appuyer la création de chaires d'université pour parfaire les aspects particuliers de la mise au point des réacteurs CANDU et pour prêter main forte dans les activités de commercialisation. À cet égard, EACL devrait se dépêcher de tirer profit du nouveau financement du gouvernement fédéral de 1200 chaires qui font la promotion de l'excellence en recherche. Le Comité recommande en outre que pour y parvenir de façon efficace, EACL devrait établir une politique sur la mise en place stratégique de telles chaires, pour activer leur établissement et pour surveiller leur état d'avancement une fois en place.

Recommandation 2

Le Comité recommande que l'emploi d'étudiants se poursuive au moins au niveau actuel.

Recommandation 3

Le Comité recommande qu'EACL travaille avec les universités et la Société nucléaire canadienne pour appuyer la rédaction et la publication d'un ou de plusieurs livres de cours afin de traiter toutes les caractéristiques principales de la technologie CANDU.

7.8 BIBLIOGRAPHIE

1. D.H. Lister, *Country Report for Canada; The Survey and Analysis of Education in the Nuclear Field.* Rapport OCDE/AEN 2000.

ANNEXE A : MEMBRES DU COMITÉ

D.A. (David) Armstrong
Professeur, Département de chimie
Université de Calgary

R.L. (Robin) Armstrong
Département de physique
Université de Toronto

D.J. (David) Burns
Professeur de génie mécanique
Université de Waterloo
(vice-président 1999)

A.A. (Albert) Driedger
Professeur, Faculté de médecine
Université de Western Ontario
(président 1999)

J. (Jon) Jennekens
Jonor & Associates

J.J. (John) Jonas
Titulaire de la chaire Birks de métallurgie et codirecteur,
Centre de transformation des métaux McGill
Département de génie minier et métallurgique
Université McGill

D.H. (Derek) Lister
Président, Génie nucléaire
Université du Nouveau-Brunswick

E.A. (Ernest) McCulloch
Scientifique émérite principal
Institut du cancer de l'Ontario
Princess Margaret Hospital

G.G. (Gilles) Patry
Vice-recteur (études)
Université d'Ottawa

J.T. (Terry) Rogers, professeur émérite
Département de génie mécanique et aérospatial
Université Carleton

D. (Daniel) Rozon, directeur
Institut de génie nucléaire
École Polytechnique de Montréal

ANNEXE B : MANDAT DU COMITÉ DE RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT AU CONSEIL D'ADMINISTRATION D'ÉNERGIE ATOMIQUE DU CANADA LIMITÉE

B-1 MANDAT

Le Comité consultatif de recherche et développement conseille le Conseil d'administration d'EACL sur les besoins, les alliances et l'orientation stratégiques des programmes de recherche et développement (R et D) d'EACL. Le Comité indique au Conseil d'administration si ces programmes ont ou n'ont pas l'envergure et les éléments nécessaires. De plus, il permet d'établir l'équilibre approprié entre les activités à court et à long terme venant appuyer le programme électronucléaire du Canada, sur le plan tant national qu'international.

B-2 ATTRIBUTIONS ET RESPONSABILITÉS

Pour s'acquitter de son mandat, le Comité consultatif de recherche et développement assume les fonctions et les responsabilités spécifiques suivantes :

- Le Comité se réunit au moins trois fois au cours de chaque exercice financier d'EACL afin de revoir la totalité des activités de R et D d'EACL, ainsi que le fonctionnement de ses principaux établissements de recherche. Le Comité doit présenter des rapports de façon périodique au Conseil d'administration d'EACL, et notamment un rapport annuel sur la qualité, la pertinence et l'envergure relative des programmes de R et D, ainsi que sur la nécessité d'en réorienter la portée, les ressources et les priorités.
- Les représentants du Comité assistent aux réunions du Comité des sciences et de la technologie du Conseil, donnent leur avis et présentent, le cas échéant, des rapports confidentiels.
- Le Comité rencontre périodiquement le personnel d'Étude des produits et du Marketing d'EACL afin d'obtenir leurs vues sur les programmes de R et D.
- Le Comité rencontre périodiquement les représentants des compagnies d'électricité canadiennes en vue de discuter de leurs besoins afin d'en rendre compte au Conseil d'administration.
- Dans son étude et son rapport sur la collaboration nationale et internationale existante et proposée, le Comité évalue également les relations actuelles et éventuelles d'EACL avec les universités canadiennes, les établissements post-secondaires et les organismes des secteurs public et privé effectuant des travaux de recherche sur l'énergie nucléaire au Canada.
- Les membres du Comité peuvent, après consultation appropriée avec EACL, comparaître devant des conseils, commissions ou comités dûment constitués des gouvernements fédéral ou provinciaux afin de présenter leur vue sur toutes les questions pertinentes du mandat du Comité.

ANNEXE C : PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS

RAPPORTS

- Rapport du Comité consultatif de recherche et développement d'EACL pour 1998
- Rapport du Comité consultatif de recherche et développement d'EACL pour 1997
- Rapport du Comité consultatif de recherche et développement d'EACL pour 1996
- Rapport du Comité consultatif de recherche et développement d'EACL pour 1995
- Rapport du Comité consultatif de recherche et développement d'EACL pour 1994
- Rapport du Comité consultatif de recherche et développement d'EACL pour 1993
- Rapport du Comité consultatif de recherche et développement d'EACL pour 1992

COMMUNICATIONS

- Examen en matière de sciences et de technologie, septembre 1994
- *Submission to the Environmental Review Panel for the Nuclear Fuel Waste Disposal Concept*, août 1995
- *Submission to the Parliamentary Sub-Committee on Natural Resources on Bill to Review Nuclear Safety Act*, octobre 1996
- *Importance du Centre canadien de neutrons pour le soutien et l'expansion future des réacteurs CANDU*, novembre 1998.
- *Presentation to Natural Resources Canada on Consultation on Options for Federal Oversight of Nuclear Fuel Waste Management and Disposal*, 17 février 1999
- Soumission préparée à la demande de Ressources naturelles Canada, *A Rationale for Canadian Expenditure on Nuclear Research and Development in the 21st Century*, 14 mai 1999
- Rapport à l'intention des hauts fonctionnaires du gouvernement, *Vision 2020 et au-delà - Le besoin de la recherche et du développement nucléaire au XXI^e siècle*, septembre 1999

ANNEXE D : LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES ACRONYMES

Abréviation ou acronyme	Définition
AIEA	Agence internationale de l'énergie atomique
CANDU X	Concept du réacteur CANDU avancé
CANDU^{MD}	CANada Deutérium Uranium
CANFLEX^{MC}, grappe de combustible	Grappe de combustible *CANDU Flexible Fueling* (renouvellement souple du combustible CANDU)
CANTHERM	Nouveau type de canal de combustible composite pour le réacteur CANDU-X
CATHENA	*Canadian Algorithm for Thermalhydraulic Network Analysis*
CCEA	Commission de contrôle de l'énergie atomique
CCN	Centre canadien de neutrons
CECE	Procédé combiné d'électrolyse et d'échange catalytique
CIRCE	Procédé industriel combiné de reformage et d'échange catalytique
CNRC	Conseil national de recherches Canada
CRI	Chaire de recherche industrielle
CRSNG	Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie
DOE	*Department of Energy* des États-Unis
DUPIC	Utilisation directe du combustible du réacteur à eau sous pression dans le réacteur CANDU
EACL	Énergie atomique du Canada limitée
GES	Gaz à effet de serre
GPC	Groupe des propriétaires de centrales CANDU
LRC	Laboratoires de Chalk River
MAPLE	*Multipurpose Applied Physics Lattice Experiment*
NRU	*National Research Universal Reactor*
ONE	Office national de l'énergie
OPG	*Ontario Power Generation Inc.*
OREOX	Oxydation, réduction du combustible à oxyde enrichi
PNRM	Programme neutronique pour la recherche sur les matériaux
REP	Réacteur à eau sous pression
RNCan	Ressources naturelles du Canada
SEU	Uranium légèrement enrichi
SG	Sujets génériques

Correspondance des délais utilisés dans le rapport	
Court terme	0-5 ans
Moyen terme	6-9 ans
Long terme	10-15 ans